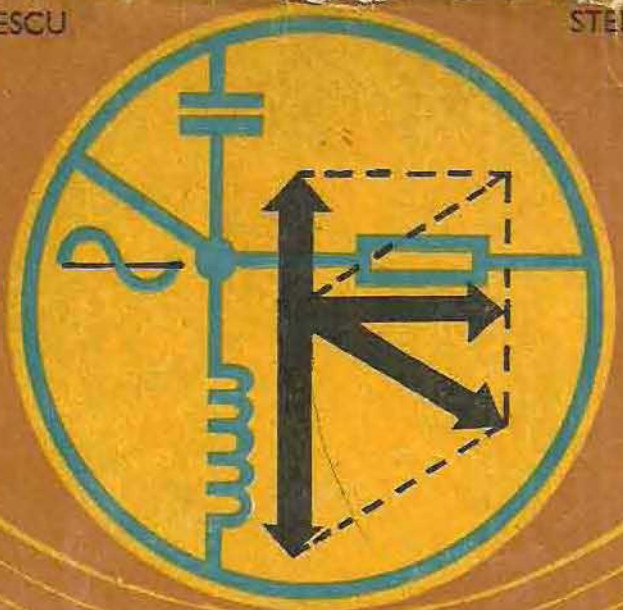
ANCA POPESCU STELIAN POPESCU



ELECTROTEHNICĂ ȘI ELECTRONICĂ

Manual pentru școli de maiștri

dr. ing. ANCA POPESCU

conf. dr. ing. STELIAN POPESCU

Electrotehnică și electronică

Manual pentru școli de maiștri

EDITURA DIDACTICĂ ȘI PEDAGOGICĂ — BUCUREȘTI, 1979

CAPITOLUL 1

ELECTROSTATICA

A. ELECTRIZAREA CORPURILOR

Corpurile materiale sînt, în mod normal, neutre din punct de vedere electric, adică sarcinile electrice negative (electronii) dintr-un anumit corp sînt egale (compensează) cu cele pozitive (protoni, pozitroni etc.) din același corp.

Prin anumite procedee, unele materiale se electrizează, adică se încarcă cu o anumită sarcină electrică.

1. ELECTRIZAREA PRIN FRECARE

S-a observat că, frecînd un baston de sticlă cu o bucată de postav, electronii trec de pe bastonul de sticlă pe postav. Așadar, prin frecare postavul căpătînd electroni în plus s-a încărcat cu sarcină negativă (electrizare negativă), în timp ce bastonul de sticlă pierzînd electroni s-a încărcat cu sarcină pozitivă.

Aceeași experiență, repetată însă cu un baston de chihlimbar, arată că de data aceasta postavul se încarcă cu sarcină pozitivă, iar bastonul de chihlimbar cu sarcină negativă.

Fenomenele care au loc în cazul corpurilor imobile purtătoare de sarcini electrice și la care sarcinile respective nu variază în timp, sînt studiate în acea parte a electrotehnicii numită *electrostatică*.

Un element de bază în studierea fenomenlor electrostatice îl constituie pendulul electrostatic (fig. 1.1) format dintr-o bobiță ușoară B (de exemplu din măduvă de soc) suspendată de un suport S printr-un fir de mătase M.

Experiența arată că corpurile încărcate cu sarcini electrice de același fel se resping (fig. 1.2, *a*), iar cele încărcate cu sarcini de semne diferite se atrag (fig. 1.2, *b*), lucru pus în evidență cu ajutorul unor perechi de pendule electrostatice.

2. ELECTRIZAREA PRIN CONTACT

Un corp electrizat, de exemplu un baston de sticlă S (fig. 1.3, *a*) electrizat pozitiv prin frecare atingînd un pendul neutru P îi transmite acestuia prin contact direct o parte din sarcina sa pozitivă astfel că în final pendulul respectiv este respins (fig. 1.3, *b*). Același lucru este valabil și pentru corpurile electrizate negativ.

3. ELECTRIZAREA PRIN INFLUENȚĂ

Apropiind un corp electrizat, de exemplu același baston de sticlă S (fig. 1.4, *a*), de un pendul neutru P, acesta este electrizat prin influență (de la distanță) cu o sarcină negativă, adică, în general, cu o sarcină de semn contrar și ca urmare pendulul va fi atras.

Observație. De fapt, prin influență, în pendulul neutru P sarcinile sînt polarizate și anume (fig. 1.4, *b*) sarcinile negative sînt atrase cît mai aproape de bastonul de sticlă, iar cele pozitive

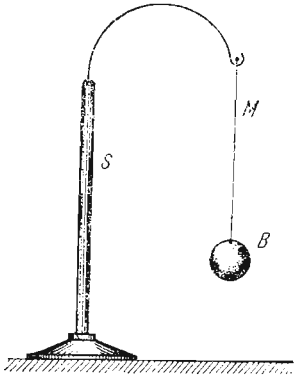


Fig. 1.1. Pendulul electrostatic.

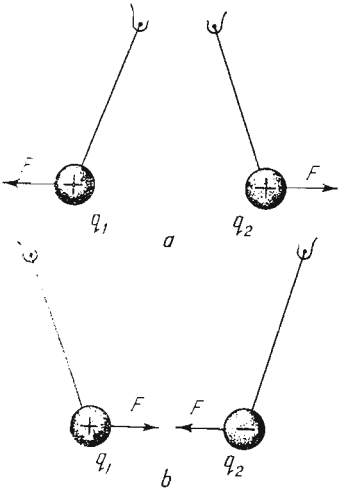


Fig. 1.2. Interacțiunea sarcinilor electrice:
a — respingere; *b* — atragere.

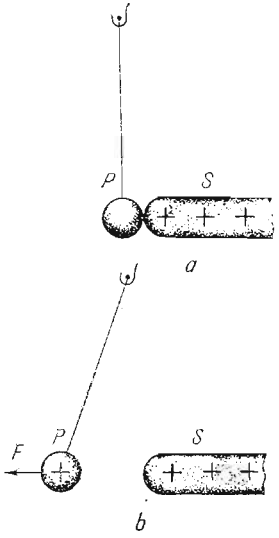


Fig. 1.3. Electrizarea prin contact:
a — atingere; *b* — respingere.

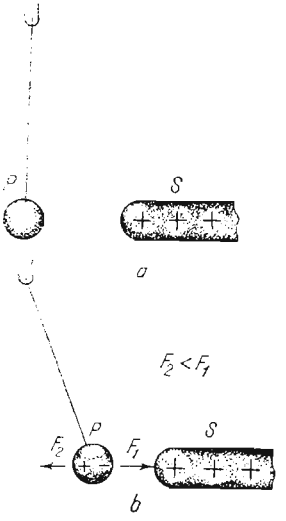


Fig. 1.4. Electrizarea prin influență:
a — electrizare; *b* — polarizarea sarcinilor.

sînt respinse în zona mai îndepărtată. În această situație forța de atracție F_1 datorată sarcinilor de semne contrare este mai mare decît forța de respingere F_2 datorată sarcinilor de același semn.

Sarcina electrică este o mărime fizică ce se măsoară cu o unitate (de măsură) care în sistemul internațional de unități SI se numește coulomb și se notează cu C. Coulombul a fost ales în mod arbitrar egal cu sarcina electrică a $6{,}24 \cdot 10^{18}$ electroni luată cu semnul minus; altfel spus, sarcina electrică q_e a unui electron este:

$$q_e = -1{,}601 \cdot 10^{-19}\ \text{C}. \tag{1.1}$$

Corpurile materiale se comportă diferit la deplasarea sarcinilor în interiorul lor. Sub acest aspect se deosebesc materialele: *conductoare, izolatoare (dielectrici)* și *semiconductoare*.

● **Conductoarele** conțin în structura lor electroni liberi („gaz electronic") care se pot deplasa liber în interiorul materialului putînd da naștere unui curent de electroni (curentul electric). Materialele conducătoare sînt în special metalele (Cu, Al, Ag, Fe etc.) și electroliții.

● **Izolatoarele (dielectricii).** Nu permit deplasarea electronilor în interiorul lor, adică le izolează. Materialele izolante sînt: sticla, porțelanul, marmura, hîrtia, lemnul, uleiul mineral, cauciucul, masele plastice, mătasea, aerul etc.

● **Semiconductoarele.** Sînt materiale care permit deplasarea sarcinilor electrice în condiții speciale, ele constituind baza elementelor electronice semiconductoare — diode, tranzistoare, tiristoare etc. (v. cap. 10, paragraful B și figurile 10.1 ... 10.3).

B. LEGEA LUI COULOMB

Se consideră două corpuri de dimensiuni mici, neglijabile în raport cu distanța între ele, încărcate cu anumite sarcini electrice. Sarcinile unor asemenea corpuri se numesc *sarcini punctiforme*. **Legea lui Coulomb** (citește Culomb), stabilită experimental, arată că: *două corpuri punctiforme încărcate cu sarcinile electrice* q_1 *și* q_2 *se resping sau se atrag cu o forță* F *a cărei mărime este proporțională cu sarcinile* q_1 *și* q_2 *și invers proporțională cu pătratul distanței* r *dintre cele două sarcini* (fig. 1.5):

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon r^2}, \tag{1.2}$$

în care ε este o mărime caracteristică denumită *permitivitate* sau *constantă dielectrică* a mediului în care se află cele două corpuri.

În sistemul internațional de unități (SI) permitivitatea vidului, practic egală cu cea a aerului, este:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9}\left[\frac{\text{F}}{\text{m}}\right]^* . \tag{1.3}$$

---

* $\frac{\text{F}}{\text{m}}$ = farad pe metru, faradul fiind o unitate de măsură pentru capacitate (vezi par. F).

Dimensional, $1\ \text{F} = 1\ \frac{\text{C}^2}{\text{N} \cdot \text{m}}\left[\frac{\text{Coulomb la pătrat}}{\text{Newton} \times \text{metru}}\right]$.

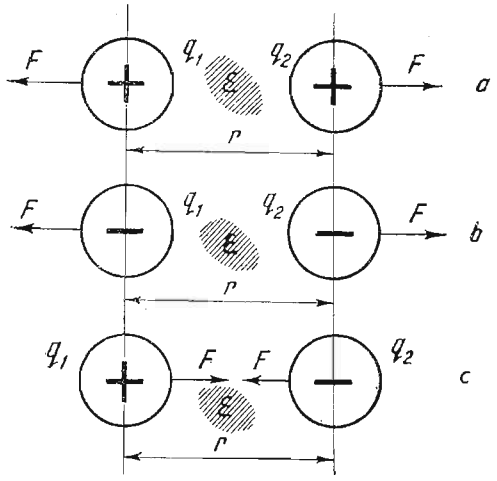


Fig. 1.5. Interacțiunea cantitativă a corpurilor electrizate:
a — ambele pozitive; *b* — ambele negative; *c* — de semne diferite.

Înlocuind relația (1.3) în (1.2) rezultă pentru vid (aer):

$$F_0 = \frac{9 \cdot 10^9 q_1 q_2}{r^2} \text{ [N]} \qquad (1.4)$$

sau: forța de interacțiune dintre două sarcini de 1 C ($q_1 = q_2 = 1$ C) așezate în vid la distanța de 1 m ($r = 1$ m) este de $9 \cdot 10^9$ N.

În cazul în care mediul în care se manifestă forțele de interacțiune între sarcinile electrice nu este vidul sau aerul ci un altul (mediu dielectric) (de exemplu: petrol, mică, parafină etc.) legea lui Coulomb rămîne valabilă cu observația că permitivitatea dielectrică ε are altă valoare, de obicei mai mare decît ε_0.

Raportul $\varepsilon/\varepsilon_0$ se numește *permitivitate dielectrică relativă* și se notează ε_r:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}. \qquad (1.5)$$

Observație. Permitivitatea dielectrică relativă este un număr fără dimensiuni.

Rezultă că în cazul unui mediu dielectric oarecare legea lui Coulomb se scrie:

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_r\varepsilon_0 r^2}. \qquad (1.6)$$

Observație. Semnul forței F este pozitiv (de respingere) dacă cele două sarcini au același semn (fig. 1.5, *a* și *b*) și negativ (de atragere) dacă acestea au semne contrarii (fig. 1.5, *c*).

C. CÎMPUL ELECTRIC

Considerînd o sarcină electrică punctiformă q_1 (fig. 1.6) în jurul acesteia se pot manifesta forțe de interacțiune în orice direcție cu orice altă sarcină q_2, q_3 ... q_n. Se spune că sarcina punctiformă q_1 dă naștere în jurul său unui cîmp electric capabil de a produce forțe de atragere sau respingere a altor sarcini. Cîmpul electric E_1 produs de sarcina electrică q_1 este definit ca raportul dintre forța F_{12} care se manifestă asupra unei sarcini oarecare q_2 și valoarea acestei sarcini:

$$E_1 = \frac{F_{12}}{q_2}. \qquad (1.7)$$

Deoarece conform legii lui Coulomb (relația 1.2) avem:

$$F_{12} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon r^2},$$

rezultă

$$E_1 = \frac{F_{12}}{q_2} = \frac{q_1}{4\pi\varepsilon r^2}. \quad (1.8)$$

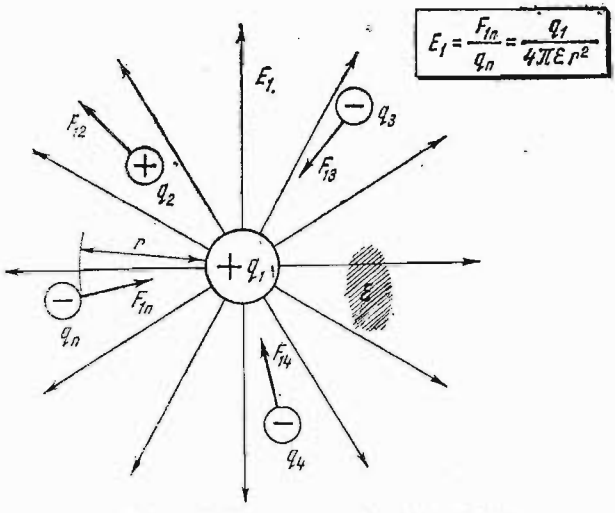


Fig. 1.6. Producerea cîmpului electric.

Pentru sarcinile punctiforme, liniile de forță ale cîmpului electric sînt radiale fiind îndreptate fie spre exterior în cazul cîmpului electric produs de o sarcină pozitivă q_1 (fig. 1.7, *a*) — sensul de respingere a unei sarcini pozitive q_2 — fie spre interior în cazul cîmpului electric produs de o sarcină negativă q_1 (fig. 1.7, *b*) — sensul de atragere a unei sarcini pozitive q_2.

Observație. Similar se poate vorbi despre cîmpul electric produs de oricare sarcină fără a avea o anumită preferință.

Astfel referindu-ne la exemplul precedent putem vorbi și de cîmpul electric al sarcinii q_2 determinat cu aceeași relație (1.7):

$$E_2 = \frac{F_{21}}{q_2}. \quad (1.9)$$

Evident: $F_{21} = F_{12} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon r^2}$

astfel că se obține un rezultat similar:

$$E_2 = \frac{q_1}{4\pi\varepsilon r^2}. \quad (1.10)$$

În cazul cîmpului electric produs de mai multe sarcini electrice punctiforme, cîmp care se manifestă într-o formă combinată prin forțe de interacțiune cu alte sarcini electrice, liniile de forță prezintă forme mai complicate. Astfel, de exemplu, liniile de forță ale cîmpului produs de două sarcini punctiforme pozitive (negative) prezintă aspectul din figura 1.7, *c*, iar cel produs de o sarcină pozitivă și alta negativă, prezintă aspectul din figura 1.7, *d*.

În sfîrșit, în unele cazuri, liniile de forță ale cîmpului electric sînt paralele (fig. 1.8) caz în care el se numește *uniform* sau *omogen*. Un asemenea cîmp omogen este produs fie de o sarcină punctiformă foarte îndepărtată, fie de o armătură plată suficient de lată (vezi paragraful F — fig. 1.11).

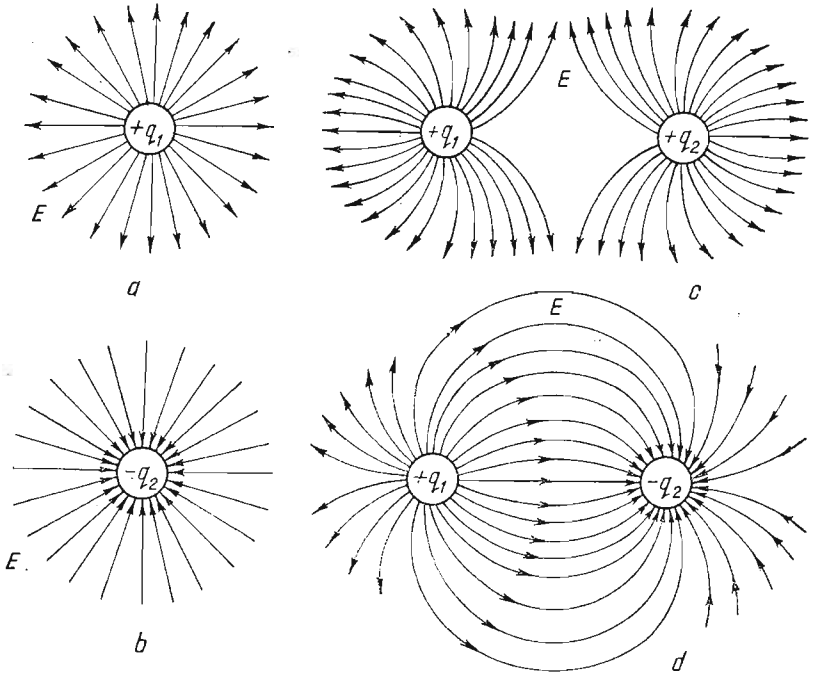


Fig. 1.7. Liniile de forță ale cîmpului electric produs de sarcini electrice:
a — pozitivă; *b* — negativă; *c* — două sarcini pozitive; *d* — sarcini de semne diferite.

D. INDUCȚIA ȘI FLUXUL ELECTRIC. TEOREMA LUI GAUSS

1. INDUCȚIA ELECTRICĂ

În unele cazuri este mai comod să se utilizeze o mărime nouă — inducția electrică D definită de expresia:

$$D = \varepsilon E. \tag{1.11}$$

Din (1.8) și (1.11) se obține:

$$D_1 = \varepsilon E_1 = \frac{\varepsilon q_1}{4\pi\varepsilon r^2} = \frac{q_1}{4\pi r^2}\left[\frac{\text{C}}{\text{m}^2}\right] \tag{1.12}$$

Rezultă deci că în cazul unui dielectric omogen valoarea inducției electrice nu depinde de permitivitatea dielectrică a mediului.

Observație. Din relația (1.12) se constată că unitatea de măsură a inducției este $\left[\frac{\text{C}}{\text{m}^2}\right]$ —coulomb pe metru pătrat.

2. FLUXUL ELECTRIC

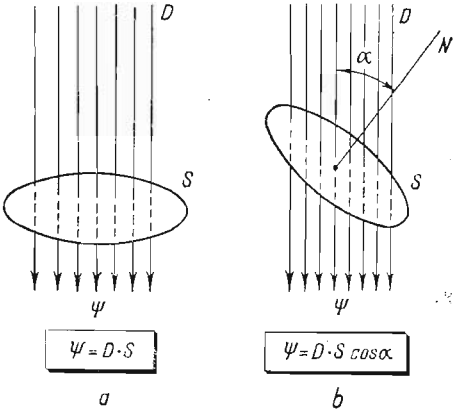


Fig. 1.8. Fluxul electric prin suprafețe plane: *a* — rectangular; *b* — oblic.

În legătură cu numeroase mărimi vectoriale care formează cîmpuri de vectori o noțiune utilizată frecvent este aceea de *flux*. De obicei **fluxul unui cîmp de vectori** *poate fi definit ca totalitatea liniilor de forță cuprinse într-un contur închis sau care străbat o suprafață oarecare bine definită*. De exemplu într-o conductă de lichid (de fluid) de secțiune S fiecare particulă lichidă are o viteză v paralelă cu axa conductei deci vectorul viteză formează în acest caz un cîmp de viteze. Fluxul vectorului v care străbate secțiunea S reprezintă produsul Q dintre vectorul viteză și secțiune:

$$Q = vS. \tag{1.13}$$

După cum se știe acest produs nu reprezintă altceva decît debitul de fluid Q (fluxul):

$$Q = v\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right] \times S[\text{m}^2] = \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right]$$

În mod analog dacă se consideră un cîmp electric omogen de inducție D și o suprafață plană S oarecare, perpendiculară pe liniile de forță (fig. 1.8, *a*), fluxul electric ψ este definit de relația:

$$\psi = DS. \tag{1.14}$$

Dacă liniile de forță ale cîmpului D fac cu normala N la suprafața S un unghi oarecare α (fig. 1.8, *b*) atunci expresia fluxului devine:

$$\psi = DS \cdot \cos \alpha. \tag{1.15}$$

Fluxul electric ψ *mai poate fi definit și prin numărul total* N *de linii de forță unitare ce străbat o anumită suprafață.*

2. TEOREMA LUI GAUSS

Dacă se consideră o suprafață închisă oarecare S, de pildă o sferă (fig. 1.9, *a*) situată într-un cîmp electric se constată că numărul de linii de forță N_i care intră în suprafața S (sferă) este același cu numărul de linii de forță N_e care ies din suprafața respectivă,

$$N_i = N_e \tag{1.16}$$

sau

$$\psi_i = \psi_e \tag{1.17}$$

adică fluxul electric de intrare ψ_i în suprafața respectivă este egal cu fluxul electric de ieșire ψ_e.

Relația (1.17) se mai poate scrie punînd în evidență fluxul total ψ_t prin suprafața considerată

$$\psi_t = \psi_i - \psi_e = 0, \tag{1.18}$$

și se enunță astfel:

Dacă în interiorul unei suprafețe S situate într-un cîmp electric nu se găsesc sarcini electrice, fluxul electric total ψ_t prin acea suprafață este nul.

Fie o sarcină electrică q situată într-un punct și o sferă de rază r cu centrul în acel punct (fig. 1.9, *b*).

În orice punct al suprafeței, inducția electrică D are valoarea:

$$D = \frac{q}{4\pi r^2} \tag{1.19}$$

este deci constantă, iar vectorul inducției este perpendicular pe suprafața sferei.

În acest caz particular fluxul electric ψ produs de sarcina q prin suprafața S a sferei ($S = 4\ \pi r^2$) se poate calcula cu relația (1.14),

$$\psi = DS = \frac{q}{4\pi r^2} 4\pi r^2 = q. \tag{1.20}$$

Se constată deci că fluxul electric ce străbate o suprafață închisă în care se găsește o sarcină electrică q este numeric egal cu sarcina respectivă.

Observație. Fluxul electric nu depinde de raza r și deci nici de forma suprafeței care închide sarcina q.

În sfîrșit dacă o suprafață oarecare S (fig. 1.9, *c*) închide mai multe sarcini electrice q_1, q_2, q_3 ... fluxul electric total care străbate acea suprafață va fi, conform relației (1.20), definit de expresia:

$$\psi = q_1 + q_2 + q_3 + \ldots = \Sigma q. \tag{1.21}$$

Această relație este cunoscută sub denumirea de *teorema lui Gauss.*

Observație. Din relația (1.20) se constată că unitatea de măsură a fluxului este [C] — coulombul.

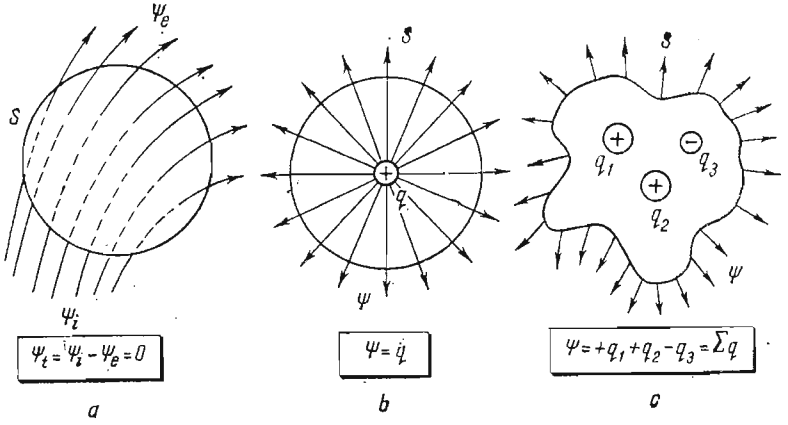


Fig. 1.9. Fluxul electric printr-o suprafață închisă (sferă):
a — fără sarcini electrice; *b* — cu o sarcină electrică; *c* — cu mai multe sarcini.

E. POTENȚIAL ȘI DIFERENȚĂ DE POTENȚIAL

1. POTENȚIAL ELECTRIC

Deoarece în mod practic este mai greu de pus în evidență sarcinile electrice, cîmpul electric se definește de obicei cu ajutorul unei noi mărimi numită *potențial electric* V și definit de relația

$$V = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{q}{r} + V_0 \tag{1.22}$$

în care: q este sarcina electrică;

r — distanța pînă la punctul în care se determină potențialul electric;

V_0 — o constantă numit potențial de referință *.

Observație. Dacă se consideră potențialul punctelor situate foarte departe, teoretic la infinit față de sarcina q ($r = \infty$) din relația (1.22) se obține $V = V_0$ deci V_0 se mai numește și *potențialul punctelor de la infinit.*

Considerînd o sarcină q (fig. 1.10, *a*) și două puncte p_1 și p_2 situate la distanța r_1 și respectiv r_2 față de această sarcină conform relației (1.22) se pot scrie potențialele V_1 și V_2 ale punctelor respective datorate sarcinii q.

$$V_1 = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{q}{r_1} + V_0 \tag{1.23}$$

și

$$V_2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{q}{r_2} + V_0. \tag{1.24}$$

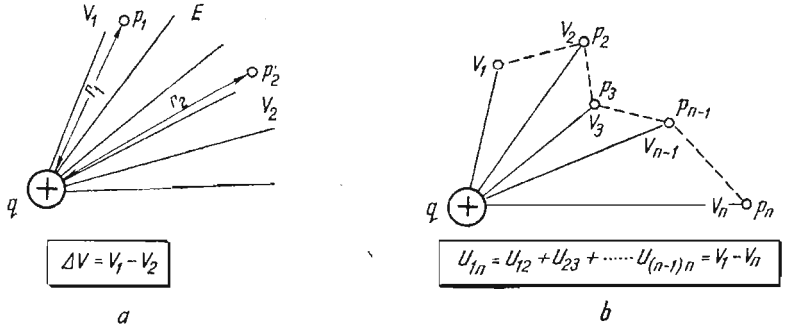


Fig. 1.10. Definirea potențialelor (tensiunilor) electrice:
a — cu două puncte; *b* — cu mai multe puncte.

* Potențialele sînt analoage cu înălțimile (presiunile) care se definesc în raport cu un nivel (presiune) de referință. Spunem de exemplu că munții Bucegi au înălțimea de cca 2 500 m însă în raport cu nivelul mării luat ca nivel de referință, altfel aceiași munți au înălțimea de circa 1 500 m față de orașul Predeal.

2. DIFERENȚA DE POTENȚIAL

Diferența $\Delta V = V_1 - V_2$ poartă numele de *diferență de potențial* între cele două puncte și se deduce analitic din expresia:

$$\Delta V = V_1 - V_2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{q}{r_1} + V_0 - \left[\frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{q}{r_2} + V_0\right]$$

$$\Delta V = \frac{1}{4\pi\varepsilon} q\left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right] = \frac{1}{4\pi\varepsilon} q\left[\frac{r_2 - r_1}{r_1 r_2}\right]. \tag{1.25}$$

Diferența de potențial între două puncte care se mai numește și *tensiune electrică* (U) precum și potențialul electric se măsoară în volți (V):

$$\Delta V = U[\mathrm{V}].$$

Să presupunem că într-un cîmp electric există o serie de puncte p_1, p_2, $p_3 \ldots p_n$ (fig. 1.10, *b*) de potențiale V_1, V_2, $V_3 \ldots V_n$ astfel că tensiunile între punctele succesive sînt:

$$U_{12} = V_1 - V_2; \quad U_{23} = V_2 - V_3; \ldots U_{(n-1)n} = V_{n-1} - V_n.$$

Se observă că însumînd tensiunile respective se obține:

$$U_{12} + U_{23} + \ldots + U_{(n-1)n} = V_1 - V_2 + V_2 - V_3 + \ldots + V_{n-1} - V_n =$$

$$= V_1 - V_n = U_{1n}. \tag{1.26}$$

Observație. Valorile potențialelor intermediare s-au anulat reciproc rămînînd numai diferența de potențial între p_1 și p_n.

Se poate conchide deci că: tensiunea între două puncte oarecare este dată de suma tensiunilor între punctele intermediare independent de traseul (poziția) pe care se află aceste puncte p_1, p_2, $p_3 \ldots p_n$ sau p'_1 p'_2, $p'_3 \ldots p'_n$.

Observație. Spre deosebire de potențial care este definit arbitrar, în raport cu un potențial de referință V_0, diferența de potențial are o valoare bine definită *, independentă de V_0.

Reluînd exemplul din figura 1.10 și relația (1.25) se va considera că acele două puncte p_1 și p_2 sînt atît de apropiate încît $r_1 \approx r_2 \approx r$ iar diferența $\Delta r = r_1 - r_2$ este foarte mică în raport cu r. În această situație cu notațiile adoptate relația (1.25) devine

$$\Delta V = -\frac{1}{4\pi\varepsilon} q \frac{\Delta r}{r^2}$$

sau, deoarece conform cu (1.8)

$$\frac{1}{4\pi\varepsilon} q \frac{1}{r^2} = E \tag{1.27}$$

rezultă:

$$\Delta V = -E\Delta r. \tag{1.28}$$

---

* Continuînd analogia cu înălțimile (presiunile) se poate remarca de exemplu că diferența de nivel între „Cota 1500" și „Cota 1400" este de 100 metri independent de nivelul de referință — nivelul mării, nivelul orașului Sinaia etc.

Din această relație se obține o nouă formă de definire a intensității cîmpului electric E:

$$E = -\frac{\Delta V}{\Delta r}, \tag{1.29}$$

adică: *intensitatea cîmpului electric E reprezintă variația potențialelor în raport cu variația distanței între punctele considerate.*

Considerînd $\Delta r = 1$ se obține $E = -\Delta V$, adică intensitatea cîmpului electric este numeric egală cu diferența de potențial pe unitatea de lungime.

După cum se știe, variația unei mărimi V în raport cu o altă mărime r este dată de derivata mărimii V în raport cu r deci: matematic intensitatea cîmpului electric se poate exprima astfel:

$$E = -\frac{dV}{dr}, \tag{1.30}$$

adică: *intensitatea cîmpului electric reprezintă derivata (cu semn schimbat) a potențialului în punctul considerat.*

În adevăr, din expresia (1.22)

$$V = \frac{1}{4\pi\varepsilon} q \frac{1}{r} + V_0, \tag{1.31}$$

prin derivare în raport cu r rezultă:

$$\frac{dV}{dr} = \frac{1}{4\pi\varepsilon} q \frac{1}{r^2} = -E. \tag{1.32}$$

Unitatea de măsură a cîmpului electric este: volt pe metru $\left[\frac{V}{m}\right]$.

F. CONDENSATOARE ELECTRICE

1. DEFINIREA CONDENSATOARELOR

Două armături conductoare A_1 și A_2 (fig. 1.11) încărcate cu sarcini electrice egale și de semn contrar $\pm Q$, separate între ele printr-un strat izolator (dielectric), formează un condensator electric. Notînd cu Q valoarea absolută a sarcinilor celor două armături și cu V_1 și V_2 potențialele acestora, diferența de potențial ΔV (tensiunea U) aplicată condensatorului va fi:

$$\Delta V = U = V_1 - V_2. \tag{1.33}$$

Raportul dintre sarcina Q a armăturilor și tensiunea U aplicată se numește capacitatea C a condensatorului:

$$C = \frac{Q}{U}. \tag{1.34}$$

Unitatea de măsură pentru capacitate este faradul și se notează cu F. Din relația (1.34) se observă că:

$$1\,\mathrm{F} = \frac{1\,\mathrm{C}}{1\,\mathrm{V}}.$$

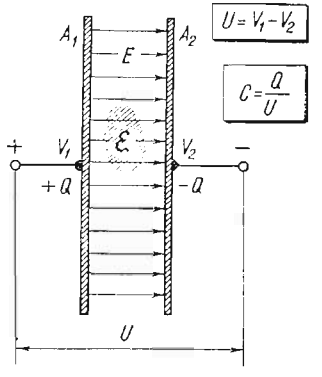


Fig. 1.11. Condensator electric.

Rezultă că faradul poate fi definit ca fiind capacitatea unui condensator care se încarcă cu o sarcină electrică de 1 coulomb atunci cînd este supus unei tensiuni de 1 volt.

Observație. Practic faradul este o unitate de măsură foarte mare în raport cu capacitățile condensatoarelor uzuale astfel că în mod curent se folosesc submultiplii faradului: microfaradul ($1\mu F = 10^{-6}$ F); nanofaradul (1 nF $= 10^{-9}$ F) și picofaradul (1 pF $= 10^{-12}$ F).

În industrie se construiesc și se utilizează o serie de condensatoare de diverse forme: plane, cilindrice etc. folosind pentru armături foițe subțiri sau plăci de aluminiu, iar ca dielectric: aerul, hîrtia, materialele plastice — de exemplu styroflex — etc.

Revenind la figura 1.11 se poate constata că cîmpul electric E dintre armături este un cîmp omogen a cărui intensitate se deduce din relația:

$$E = \frac{U}{d}\left[\frac{V}{m}\right] \tag{1.35}$$

în care d este distanța dintre cele două armături.

2. LEGAREA CONDENSATOARELOR

● **Legarea în serie.** Mai multe condensatoare de capacitate C_1, C_2, C_3 ... C_n sînt legate în serie atunci cînd ele sînt conectate ca în figura 1.12, *a*.

Sub influența cîmpului electric produs între armăturile condensatoarelor de către tensiunea U fiecare condensator se încarcă cu aceeași sarcină electrică Q. În adevăr, de pildă pe condensatorul de capacitate C_1 apare sarcina $+Q$ și $-Q$. Pe armătura condensatorului C_2 legată de armătura $-Q$ a condensatorului C_1 apare datorită electrizării prin influență sarcina $+Q$ și așa mai departe. Altfel spus, fiecare conductor de legătură dintre condensatoare era anterior neutru din punct de vedere electric iar acum, prin electrizare, sarcinile $-Q$ și $+Q$ polarizate sînt, evident, egale.

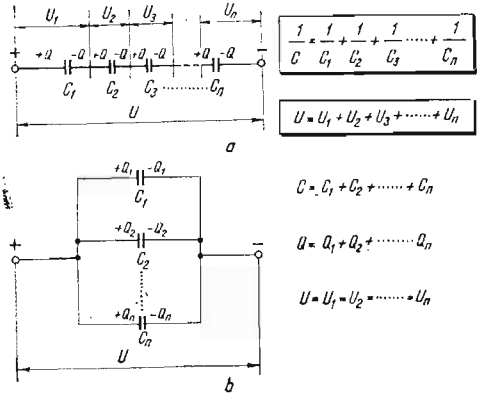


Fig. 1.12. Legarea condensatoarelor:
a — serie; *b* — paralel.

Cunoscînd sarcina Q, aceeași pe toate condensatoarele se pot deduce tensiunile la bornele fiecăruia:

$$U_1 = \frac{Q}{C_1}; \quad U_2 = \frac{Q}{C_2};$$

$$U_3 = \frac{Q}{C_3}; \ \ldots \ U_n = \frac{Q}{C_n}. \tag{1.36}$$

Conform relației (1.26) tensiunea aplicată este egală cu suma tensiunilor U_1, U_2, U_3 ...

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \ldots + U_n$$

sau

$$U = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3} + \ldots + \frac{Q}{C_n} = Q\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \ldots + \frac{1}{C_n}\right). \quad (1.37)$$

Un condensator echivalent de capacitate C este caracterizat prin aceea că supus aceleiași tensiuni U se va încărca cu aceeași sarcină Q:

$$U = \frac{Q}{C}. \quad (1.38)$$

Din compararea expresiilor (1.37) și (1.38) rezultă că capacitatea echivalentă C a celor n condensatoare legate în serie va fi:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \ldots + \frac{1}{C_n}. \quad (1.39)$$

În concluzie: *valoarea inversă a capacității echivalente este egală cu suma valorilor inverse ale capacităților parțiale.*

Aplicația 1.1. Trei condensatoare avînd capacitățile $C_1 = 40$ μF; $C_2 = 200$ μF și $C_3 = 50$ μF sînt legate în serie și supuse unei tensiuni $U = 100$ V. Se cere:

1. Capacitatea echivalentă a condensatoarelor?
2. Sarcina Q cu care se încarcă fiecare condensator?
3. Tensiunile U_1, U_2 și U_3 de la bornele fiecărui condensator?

Răspuns. 1. Capacitatea echivalentă se obține din relația (1.39)

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{40 \cdot 10^{-6}} + \frac{1}{200 \cdot 10^{-6}} + \frac{1}{50 \cdot 10^{-6}} = \frac{1}{20 \cdot 10^{-6}},$$

de unde rezultă:

$$C = 20 \cdot 10^{-6}\ \text{F} = 20\ \mu\text{F}.$$

2. Sarcina Q se obține din expresia (1.37)

$$Q = CU = 20 \cdot 10^{-6}\ \text{F} \times 100\ \text{V} = 2 \cdot 10^{-3}\ \text{C} = 2\ \text{mC}.$$

3. Tensiunile fiecărui condensator sînt:

$$U_1 = \frac{Q}{C_1} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{40 \cdot 10^{-6}} = 50\ \text{V};$$

$$U_2 = \frac{Q}{C_2} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{200 \cdot 10^{-6}} = 10\ \text{V};$$

$$U_3 = \frac{Q}{C_3} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{50 \cdot 10^{-6}} = 40\ \text{V}.$$

Observația 1. Capacitatea echivalentă C(20 μF) este mai mică decît cea mai mică dintre capacități ($C_1 = 40$ μF).

Observația 2. Celei mai mari capacități ($C_2 = 200$ μF) îi corespunde cea mai mică tensiune la borne ($U_2 = 10$ V) și invers.

● **Legarea în paralel.** Mai multe condensatoare de capacitate C_1, C_2, $C_3 \ldots C_n$ sînt legate în paralel atunci cînd sînt conectate ca în figura 1.12, *b*.

Sub influența cîmpului electric produs de tensiunea comună U — aceeași pentru toate condensatoarele — acestea se încarcă cu sarcinile electrice Q_1, Q_2, $Q_3 \ldots Q_n$ diferite pentru fiecare condensator.

$$Q_1 = UC_1;\quad Q_2 = UC_2;\quad Q_3 = UC_3;\ \ldots\ Q_n = UC_n. \quad (1.40)$$

Sarcina totală acumulată de toate condensatoarele va fi:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \ldots + Q_n = UC_1 + UC_2 + UC_3 + \ldots + UC_n \quad (1.41)$$

sau

$$Q = U(C_1 + C_2 + C_3 + \ldots + C_n) = UC. \quad (1.42)$$

Rezultă deci, că capacitatea echivalentă C a celor n condensatoare legate în paralel este:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \ldots + C_n. \quad (1.43)$$

Aplicația 1.2. Condensatoarele din exemplul precedent ($C_1 = 40$ μF; $C_2 = 200$ μF și $C_3 = 50$ μF) sînt legate în paralel și supuse aceleiași tensiuni $U = 100$ V. Se cere:

1. Capacitatea echivalentă?
2. Sarcina electrică a fiecărui condensator și sarcina totală Q?
3. Tensiunile la bornele fiecărui condensator?

Răspuns.

1. Capacitatea echivalentă — relația (1.43) — este

$$C = C_1 + C_2 + C_3 = 40 + 200 + 50 = 290 \ \mu F.$$

2. Sarcinile electrice ale fiecărui condensator — relația (1.40) — sînt:

$$Q_1 = UC_1 = 100 \cdot 40 \cdot 10^{-6} = 4 \cdot 10^{-3} C = 4 \ mC$$

$$Q_2 = UC_2 = 100 \cdot 200 \cdot 10^{-6} = 20 \cdot 10^{-3} C = 20 \ mC$$

$$Q_3 = UC_3 = 100 \cdot 50 \cdot 10^{-6} = 50 \cdot 10^{-3} C = 5 \ mC$$

iar sarcina totală acumulată — relația (1.41) — este:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 4 + 20 + 5 = 29 \ mC.$$

3. Tensiunile la bornele condensatoarelor sînt:

$$U_1 = U_2 = U_3 = U = 100 \ V.$$

● **Legarea mixtă** reprezintă o combinație de legare serie și paralel. Calculul mărimilor care ne interesează se efectuează separat pentru fiecare conexiune în parte conform relațiilor de mai sus.

Aplicația 1.3. Șase condensatoare C_1, C_2 ... C_6 sînt legate în conexiune mixtă ca în figura 1.13, *a*, fiind alimentate cu tensiunea $U = 500$ V.

Să se determine aceiași parametri ca și în aplicațiile precedente.

Răspuns. Se determină cu ajutorul relației (1.39) capacitatea echivalentă C_7 a celor trei condensatoare (C_1, C_2, C_3) legate în serie:

$$\frac{1}{C_7} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} = \frac{1}{200 \cdot 10^{-6}} + \frac{1}{250 \cdot 10^{-6}} + \frac{1}{1\,000 \cdot 10^{-6}} = \frac{1}{100 \cdot 10^{-6}}$$

deci:

$$C_7 = 100 \cdot 10^{-6} \ F = 100 \ \mu F.$$

Condensatorul echivalent C_7 constituie împreună cu C_4 și C_5 o conexiune echivalentă paralelă (fig. 1.13, *b*) deci conform cu relația (1.43) se obține:

$$C_8 = C_7 + C_4 + C_5 = 100 + 50 + 250 = 400 \ \mu F.$$

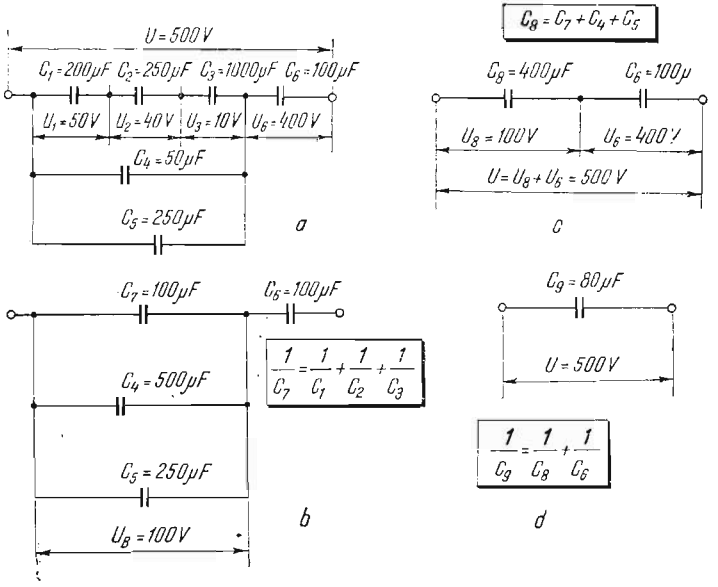


Fig. 1.13. Exemplu de legare mixtă a condensatoarelor:
a — schema inițială; *b*, *c*, *d* — scheme echivalente.

Astfel schema s-a redus de fapt (fig. 1.13, *c*) la două condensatoare C_8 (echivalent) și C_6 (real) legate în serie. Rezultă capacitatea totală a schemei (fig. 1.13, *d*):

$$\frac{1}{C_9} = \frac{1}{C_8} + \frac{1}{C_6} = \frac{1}{400 \cdot 10^{-6}} + \frac{1}{100 \cdot 10^{-6}} = \frac{1}{80 \cdot 10^{-6}},$$

deci

$$C_9 = 80 \cdot 10^{-6} \text{ F} = 80 \ \mu\text{F}.$$

Aplicînd tensiunea $U = 500$ V rezultă că sarcina comună pe C_8 și C_6 va fi:

$$Q_8 = Q_6 = Q_9 = UC_9 = 500 \cdot 80 \cdot 10^{-6} = 40 \text{ mC}.$$

Rezultă tensiunile pe C_8 și C_6:

$$U_8 = \frac{Q_9}{C_8} = \frac{40 \cdot 10^{-3}}{400 \cdot 10^{-6}} = 100 \text{ V};$$

$$U_6 = \frac{Q_9}{C_6} = \frac{40 \cdot 10^{-3}}{100 \cdot 10^{-6}} = 400 \text{ V}.$$

Observație. Se verifică: $U = U_8 + U_6 = 100 + 400 = 500$ V.

Avînd tensiunea U_8 care reprezintă de fapt tensiunea comună a capacităților C_7 (echivalentă), C_4 și C_5, se deduc sarcinile parțiale:

$$Q_7 = U_8C_7 = 100 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 10 \cdot 10^{-3}\text{C} = 10 \text{ mC};$$

$$Q_3 = U_8C_3 = 100 \cdot 50 \cdot 10^{-6} = 5 \text{ mC};$$

$$Q_4 = U_8C_4 = 100 \cdot 250 \cdot 10^{-6} = 25 \text{ mC}.$$

Observație. Se verifică: $Q_8 = Q_7 + Q_3 + Q_4 = 10 + 5 + 25 = 40$ mC.

Sarcina comună condensatoarelor de capacitate C_1, C_2 și C_3 fiind $Q_7 = 10$ mC, rezultă repartiția tensiunii $U_8 = U_7 = 100$ V pe cele trei condensatoare înseriate:

$$U_1 = \frac{Q_7}{C_1} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{200 \cdot 10^{-6}} = 50 \text{ V}.$$

$$U_2 = \frac{Q_7}{C_2} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{250 \cdot 10^{-6}} = 40 \text{ V}.$$

$$U_3 = \frac{Q_7}{C_3} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{1\,000 \cdot 10^{-6}} = 10 \text{ V}.$$

Observație. Se verifică: $U_7 = U_1 + U_2 + U_3 = 50 + 40 + 10 = 100$ V.

G. POLARIZAREA DIELECTRICILOR. RIGIDITATEA DIELECTRICĂ

A. POLARIZAREA DIELECTRICILOR

În absența cîmpurilor electrice atomii sau moleculele corpurilor sînt neutre din punct de vedere electric.

Aceasta înseamnă că sarcinile negatice ale electronilor compensează sarcinile pozitive ale nucleului atomic (fig. 1.14, *a*).

Deși materialele dielectrice (izolatoare) nu conduc curentul electric totuși atomii acestora suferă anumite transformări sub influența cîmpului electric.

În adevăr, considerînd un atom plasat într-un cîmp electric E (fig. 1.14, *b*) se constată că, conform celor arătate în paragraful C, nucleul atomului fiind pozitiv este supus unei forțe coulombiene în direcția cîmpului electric E, iar electronii sînt supuși unor forțe de sens opus. Acest fenomen reprezintă polarizarea atomilor din materialul dielectric.

Ca urmare atomul se comportă ca și cum ar fi format din două sarcini egale $+q$ și $-q$ de semn contrar situate la o mică distanță între ele; atomul este astfel polarizat. Fenomenul descris poartă numele de *polarizarea dielectricilor*.

2. RIGIDITATEA DIELECTRICILOR

Dacă polarizarea dielectricilor devine prea mare datorită unui cîmp electric prea intens materialele izolante devin conductoare, în dielectric apare o deplasare de electroni deci un curent electric care încălzește (arde) dielectricul respectiv (fig. 1.15).

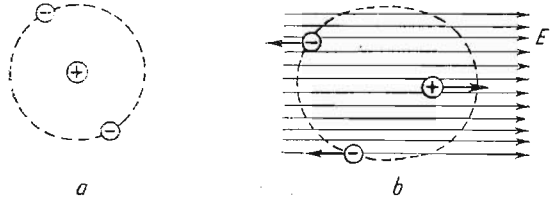


Fig. 1.14. Polarizarea dielectricilor: *a* — în lipsa cîmpului electric; *b* — în prezența cîmpului electric

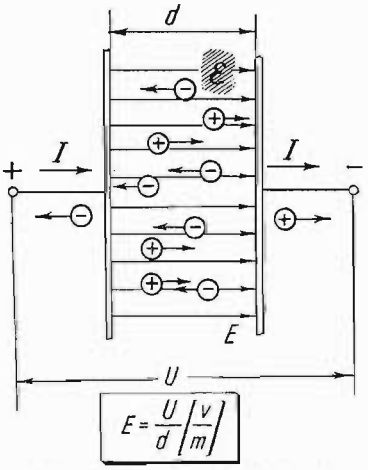


Fig. 1.15. Străpungerea dielectricilor.

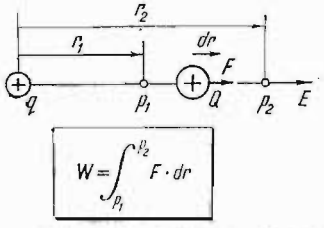


Fig. 1.16. Energia cîmpului electric.

Acest fenomen cunoscut sub numele de *străpungerea izolatorului* este ireversibil în sensul că izolatorul odată străpuns nu-și mai recapătă proprietățile izolante.

Intensitatea maximă a cîmpului E_s care poate fi suportată de dielectric fără a se produce străpungerea se numește *rigiditate dielectrică* și ea variază de la un izolant la altul. Rigiditatea dielectrică se măsoară, ca și cîmpul, în $\left[\frac{V}{m}\right]$ — unitate SI — sau, uzual, cu ajutorul unui multiplu: $\frac{kV}{cm}$.

H. ENERGIA CÎMPULUI ELECTRIC

1. DEFINIREA ENERGIEI ELECTRICE

Să presupunem o sarcină electrică de probă Q situată în cîmpul electric produs de o altă sarcină q (fig. 1.16). Admițînd că cele două sarcini au polarități identice rezultă că în conformitate cu relația (1.2) asupra sarcinii Q se va manifesta o forță de respingere:

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{qQ}{r^2}. \tag{1.44}$$

Deplasarea sarcinii Q datorată forței F pe o distanță infinit mică dr înseamnă producerea unui lucru mecanic infinit mic dW egal cu forța F înmulțită cu deplasarea dr:

$$dW = F dr \tag{1.45}$$

sau, înlocuind (1.44) în (1.45) se obține

$$dW = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{qQ}{r^2}dr. \tag{1.46}$$

Lucrul mecanic (energia) total la deplasarea sarcinii Q din punctul p_1 în p_2 (fig. 1.16) se obține prin însumarea lucrurilor mecanice elementare adică prin integrarea lui dW, în raport cu variabila r — integrarea între punctul p_1 (distanța r_1) și p_2 (distanța r_2)

$$W = \int_{p_1}^{p_2} F \, dr = \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{4\pi\varepsilon} \frac{qQ}{r^2} \, dr \tag{1.47}$$

$$W = \frac{1}{4\pi\varepsilon} qQ \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon} qQ \left[-\frac{1}{r} \Big|_{r_1}^{r_2} \right] = \frac{1}{4\pi\varepsilon} qQ \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right]. \tag{1.48}$$

Deoarece în conformitate cu (1.22) expresia potențialului electric într-un cîmp produs de sarcina q la distanța r este:

$$V = \frac{1}{4\pi\varepsilon} q \frac{1}{r} + V_0$$

rezultă că relația (1.48) mai poate fi pusă sub forma

$$W = \left[\frac{1}{4\pi\varepsilon} q \frac{1}{r_1} - \frac{1}{4\pi\varepsilon} q \frac{1}{r_2} \right] Q = (V_1 - V_2) Q = U_{12} Q. \tag{1.49}$$

În concluzie se poate spune că lucrul mecanic sau energia cîmpului electric produs de o sarcină Q între două puncte p_1 și p_2 este dată de diferența de potențial (tensiunea U_{12}) între cele două puncte înmulțită cu sarcina Q.

Observație. Din relația (1.49) se constată că, deoarece $V_1 > V_2$, diferența $V_1 - V_2$ este pozitivă deci energia W este pozitivă, ceea ce înseamnă că avem de-a face cu un lucru mecanic produs de sarcina Q. Dacă lucrul mecanic se efectuează împotriva forței coulombiene F energia W rezultă negativă, deci este absorbită de către sarcina Q.

Ținînd seama de faptul că în sistemul internațional de unități — SI — energia se măsoară în jouli (J) din relația (1.49) rezultă că:

$$1 \text{ J} = 1 \text{ V} \times 1 \text{ C},$$

de unde se obține o nouă definire a voltului:

$$1 \text{ V} = \frac{1 \text{J}}{1 \text{C}}.$$

2. PRODUCEREA ENERGIEI ELECTRICE

Industrial, separarea sarcinilor electrice necesară producerii diferențelor de potențial sau a tensiunilor electrice se face cu ajutorul unor elemente speciale numite *surse electrice* S (fig. 1.17, *a*).

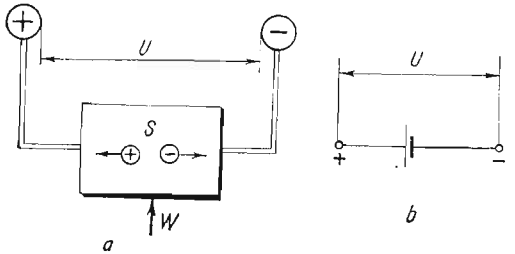


Fig. 1.17. Sursă de producere a energiei electrice:
a — producerea energiei electrice; *b* — simbolul electric al unei surse.

O sursă electrică primește din afară o energie W care asigură producerea energiei electrice la o tensiune U.

În funcție de natura sursei de energie absorbită (mecanică, chimică, termică etc.) sursele de energie electrică pot fi: mașinile electrice rotative, elementele galvanice — acumulatoarele —, termoelementele etc.

Simbolul unei surse electrice este prezentat în figura 1.17, *b*.

REZUMAT

- Prin frecare, atingere sau influență corpurile pot fi electrizate, adică încărcate cu sarcini electrice pozitive sau negative.
- Corpurile încărcate cu sarcini de același fel se resping, iar cele cu sarcini de semne contrarii se atrag.
- Legea lui Coulomb stabilește cantitativ valorile forțelor de interacțiune între sarcini electrice.
- Cîmpul electric reprezintă raportul dintre forța coulombiană și sarcina asupra căreia se manifestă această forță.
- Inducția, fluxul și potențialul electric sînt mărimi ce definesc cîmpul electric.
- Teorema lui Gauss stabilește că fluxul electric ce străbate o suprafață închisă (aferentă unui volum) este numeric egal cu suma sarcinilor electrice conținute în interiorul suprafeței respective.
- Tensiunea electrică reprezintă diferența de potențial între două puncte ale cîmpului electric și nu depinde de traiectul parcurs între cele două puncte.
- Condensatoarele electrice sînt elemente capabile de a înmagazina sarcini electrice pe două armături conductoare separate de un dielectric (izolant).
- Străpungerea unui izolant se datorește polarizării dielectricilor și reprezintă un proces ireversibil caracterizat printr-o deplasare de electroni (curent electric).

VERIFICAREA CUNOȘTINȚELOR

1. Sensul forței coulombiene depinde de:
   a — valoarea permitivității dielectrice?
   b — polaritatea sarcinilor?
   c — semnul diferenței de potențial?
2. Care din mărimile electrostatice au o valoare ce nu depinde de natura mediului:
   a — cîmpul electric?
   b — inducția electrică?
   c — potențialul electric?
3. Fluxul electric produs de una sau mai multe sarcini electrice depinde de:
   a — forma suprafeței care închide sarcina (sarcinile) electrică?
   b — mărimea suprafeței, idem?
   c — suma sarcinilor închise de suprafața respectivă?
4. Tensiunea electrică este o funcție de:
   a — cîmpul electric între două puncte?
   b — potențialul de referință?
   c — traseul parcurs între două puncte?

5. Un condensator de o capacitate mai mare se poate obține prin legarea:
   a — în serie?
   b — în paralel?
   c — mixtă?
6. Având un număr dat de condensatoare cel mai mic cîmp electric pe fiecare condensator se poate obține prin legare:
   a — în serie?
   b — în paralel?
   c — mixtă?
7. Rigiditatea dielectricilor reprezintă capabilitatea unui izolator de a rezista la:
   a — o sarcină electrică mare?
   b — un flux electric mare?
   c — un cîmp electric mare?
8. Lucrul mecanic (energia) de deplasare a unei sarcini într-un cîmp electric este proporțională cu:
   a — distanța parcursă de sarcină?
   b — potențialul de referință ales?
   c — diferența de potențial între punctul inițial și final?

CAPITOLUL 2

CURENTUL CONTINUU

A. CURENTUL ELECTRIC CONTINUU. EFECTELE SALE

1. CURENTUL CONTINUU

După cum s-a arătat în capitolul precedent un material izolant — dielectric — supus unei tensiuni (cîmp electric) continue nu este străbătut de curent electric * datorită faptului că dielectricul nu conține electroni liberi. Curentul electric poate circula în mod normal numai prin conductoare datorită existenței electronilor liberi din structura acestor materiale. Considerînd o bucată de conductor $A - B$ (fig. 2.1) între capetele căruia se aplică o diferență de potențial $U = V_A - V_B$ se constată că electronii (sarcinile negative) se vor deplasa de la punctul B cu potențial mai scăzut spre punctul A cu potențial mai ridicat sub forma unui curent de electroni I_e. Același curent circulă prin sursa S de la borna plus (+) — sarcini pozitive — spre borna minus (—) — sarcini negative.

Deplasarea sarcinilor electrice prin conductoare formează *curentul electric*. Deoarece deplasarea se face în mod continuu — permanent — în același sens, acesta s-a numit *curent electric continuu*.

S-a convenit în mod arbitrar să se considere sensul pozitiv de circulație al curentului electric sensul invers deplasării sarcinilor negative.

În consecință curentul electric I circulă prin conductoare (fig. 2.1) de la borna plus (+) — potențialul mai ridicat — spre borna minus (—) — potențial mai scăzut, — iar prin sursă circulă de la minus spre plus.

Curentul electric este caracterizat prin intensitatea sa I care reprezintă raportul dintre cantitatea de electricitate Q și timpul t în care aceasta trece prin conductorul considerat:

$$I = \frac{Q}{t} \left[\frac{\text{C}}{\text{s}}\right]. \tag{2.1}$$

Observație. Intensitatea curentului este numeric egală cu cantitatea de electricitate — exprimată în coulombi (C) — care trece prin conductor într-o secundă (s).

* Se exceptează străpungerea dielectricului care reprezintă un fenomen anormal și ireversibil (de distrugere).

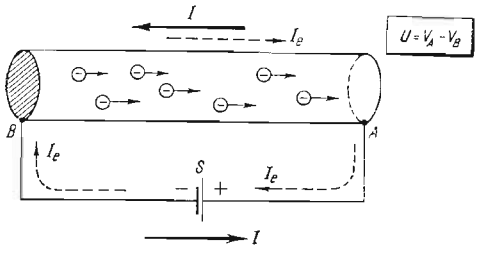


Fig. 2.1. Curentul electric într-un conductor.

Pentru o cantitate de electricitate infinit mică dQ ce străbate conductorul într-un timp infinit mic dt relația (2.1) se poate exprima astfel:

$$I = \frac{dQ}{dt}. \tag{2.2}$$

Este evident că, deoarece numărul de electroni — sarcina Q — care trece prin conductor este același în orice secțiune a conductorului rezultă că intensitatea curentului electric este aceeași în toate punctele conductorului.

Din relația (2.1) se constată că intensitatea curentului electric se măsoară în coulombi pe secundă [C/s] unitate care în sistemul internațional de unități SI a primit numele de amper — simbol A —

$$1\ \text{A} = 1\ \frac{C}{s}. \tag{2.3}$$

Raportul J între intensitatea I(A) a curentului și secțiunea S(m^2) a conductorului se numește *densitate de curent:*

$$J = \frac{I}{S}\ \left[\frac{A}{\text{m}^2}\right]. \tag{2.4}$$

În sistemul SI densitatea de curent se măsoară în amperi pe metru pătrat [A/m^2] sau, în mod frecvent, printr-un submultiplu al acestei unități: amper pe milimetru pătrat [A/mm^2].

Se constată că:

$$1\ \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} = \frac{1\text{A}}{(10^{-3}\ \text{m})^2} = 10^6\ \frac{\text{A}}{\text{m}^2}.$$

2. EFECTUL CURENTULUI ELECTRIC

Trecerea curentului electric printr-un conductor poate fi pusă în evidență printr-o serie de efecte — fenomene:

● **Efectul termic.** Conductoarele parcurse de curent electric se încălzesc producînd o cantitate de căldură K în mediul înconjurător (fig. 2.2, *a*);

● **Efectul luminos.** Cînd densitatea de curent este foarte mare încălzirea este atît de puternică încît conductorul ajunge la incandescență (fig. 2.2, *b*) ca de exemplu filamentul F al lămpii electrice L care emite fluxul luminos Φ;

● **Efectul chimic.** Dacă curentul electric traversează o soluție de apă cu acid sulfuric (fig. 2.2, *c*) apa se descompune în elementele sale — oxigen (O)

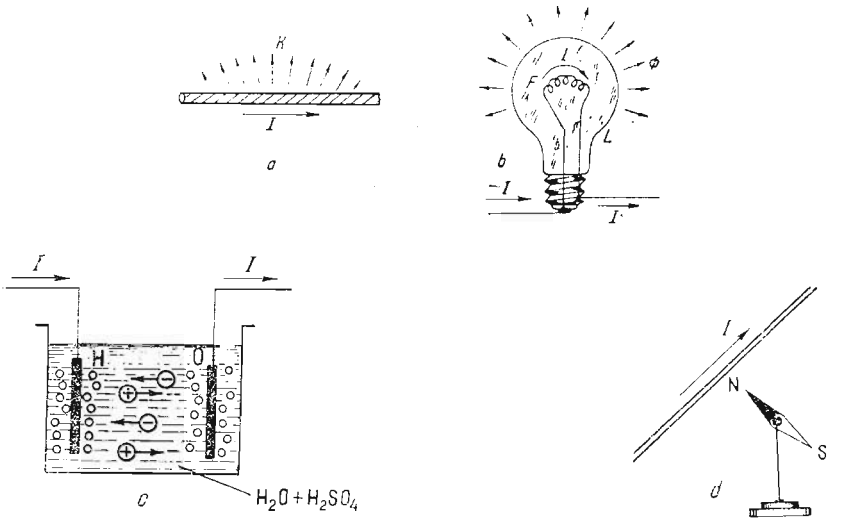


Fig. 2.2. Efectele curentului electric:
a — termic; *b* — luminos; *c* — chimic; *d* — magnetic.

la borna minus și hidrogen (H) la borna plus. Trebuie menționat că în soluțiile chimice curentul electric se datorește nu numai deplasării electronilor, ca la metale, ci și deplasării (în sensul pozitiv) ionilor pozitivi (+).

Datorită acestei diferențe metalele se numesc *conductoare de speța întîi*, iar soluțiile chimice (electroliții) *conductoare de speța a doua.*

● **Efectul magnetic.** Dacă se apropie un ac magnetic al unei busole de un conductor parcurs de curent electric, acesta nu mai arată nordul ci se plasează perpendicular pe direcția conductorului, ceea ce dovedește că curentul electric produce un cîmp magnetic (v. cap. 3).

B. LEGEA LUI OHM. REZISTENȚELE ELECTRICE

1. LEGEA LUI OHM *

Experimental s-a stabilit că curentul electric I dintr-un conductor este direct proporțional cu tensiunea U aplicată:

$$I = GU \tag{2.4}$$

în care G este un factor de proporționalitate numit *conductanță electrică.*

În mod obișnuit se folosește o mărime inversă conductanței numită *rezistență electrică* R:

$$R = \frac{1}{G} \text{ sau } G = \frac{1}{R},$$

* (Citește „om").

astfel că, relația (2.4) se scrie de obicei sub forma:

$$I = \frac{U}{R}, \tag{2.5}$$

relație cunoscută sub numele de *legea lui Ohm.*

Intensitatea curentului electric I reprezintă raportul dintre tensiunea electrică U și rezistența R a conductorului.

Din relația (2.5) se obține o altă formă pentru legea lui Ohm:

$$R = \frac{U}{I}\left[\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{A}}\right]. \tag{2.6}$$

Rezistența unui conductor între două puncte este dată de raportul dintre tensiunea U între cele două puncte și intensitatea I a curentului prin conductor.

Rezistența electrică se măsoară în volți pe amperi [V/A]. Această unitate de măsură se numește ohm (simbol Ω],

$$1\,\Omega = 1\,\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{A}}. \tag{2.7}$$

În sfîrșit, relația (2.5) se mai poate scrie

$$U = RI, \tag{2.8}$$

deci legea lui Ohm se poate enunța și în altă formă:

Un curent electric de intensitate I ce străbate rezistența electrică R produce la bornele sale o diferență de potențial (tensiune) U egală cu produsul RI.

Diferența de potențial produsă de trecerea curentului printr-o rezistență se numește și *cădere de tensiune* sau *pierdere de tensiune.*

2. REZISTENȚE ELECTRICE

Pentru un conductor de formă cilindrică de lungime l și secțiune S rezistența R este proporțională cu lungimea l a conductorului și invers proporțională cu suprafața (secțiunea) S:

$$R = \rho\,\frac{l}{S}\ [\Omega], \tag{2.9}$$

în care:

ρ este un factor de proporționalitate denumit *rezistivitate.*

Rezistivitatea este o mărime specifică fiecărui material conductor. Din relația (2.9) se obține valoarea rezistivității:

$$\rho = \frac{RS}{l}\left[\frac{\Omega \cdot \mathrm{m}^2}{\mathrm{m}}\right] \text{ sau } [\Omega\ \mathrm{m}]. \tag{2.10}$$

Pentru conductoarele uzuale rezistența R se exprimă în [Ω], lungimea l în [m], secțiunea S în [mm^2], iar rezistivitatea ρ în $\left[\frac{\Omega \mathrm{mm}^2}{\mathrm{m}}\right]$.

Cu cît rezistivitatea este numeric mai mică, cu atît materialul este mai bun conducător (tabelul 2.1).

Tabelul 2.1.

Material	Rezistivitatea (la 20°C) ρ [Ω mm^2/m]	Coeficient de temperatură α [1/°C]
Argint	$0{,}0164 = \frac{1}{61}$	$3{,}5 \cdot 10^{-3}$
Cupru	$0{,}0176 = \frac{1}{57}$	$4 \cdot 10^{-3}$
Aluminiu	$0{,}029 = \frac{1}{34}$	$4{,}1 \cdot 10^{-3}$
Fier	$0{,}13 = \frac{1}{7}$	$6 \cdot 10^{-3}$
Constantan	$0{,}5 = \frac{1}{2}$	$0{,}005 \cdot 10^{-3}$
Manganin	$0{,}42 = \frac{1}{2{,}4}$	$0{,}006 \cdot 10^{-3}$
Cromnichel	$1{,}2 = \frac{1}{0{,}83}$	$0{,}8 \cdot 10^{-3}$

În tabelul 2.1 rezistivitatea a fost indicată atît sub formă zecimală cît și sub formă fracționară care este mai sugestivă. În adevăr din relația (2.10) se observă că pentru un conductor de secțiune $S = 1$ mm^2 și rezistență $R = 1\ \Omega$ numitorul din fracția care exprimă rezistivitatea reprezintă lungimea conductorului exprimată în metri. De exemplu:

1 Ω (conductor 1 mm^2) = 57 m conductor Cu = 34 m conductor Al etc.

Observația 1. Datorită costului relativ scăzut și rezistivității mici conductoarele din cupru și aluminiu sînt folosite în mod frecvent în Electrotehnică.

Observația 2. Conductoarele realizate din aliajele denumite: *constantan*, *manganin* și *cromnichel* au rezistivități foarte mari:

1 Ω (conductor 1 mm^2) = 2 m conductor constantan = 2,4 m conductor manganin = = 0,83 m conductor cromnichel.

Aceste materiale sînt folosite în realizarea industrială a rezistențelor electrice pentru fiare de călcat, reșouri etc.

Dacă în locul rezistenței R se folosește conductanța G, legea lui Ohm se scrie — v. relația (2.4) —

$$I = GU, \tag{2.4}$$

deci

$$G = \frac{I}{U}\left[\frac{\text{A}}{\text{V}}\right].$$

Conductanța se măsoară în

$$\left[\frac{A}{V}\right] \equiv \frac{1}{\Omega} = \Omega^{-1} = \text{mho}.$$

Unitatea de măsură Ω^{-1} se numește mho * (citește „mo") sau siemens (citește „simens").

Valoarea inversă a rezistivității ρ se numește *conductivitate* γ și se măsoară în $\left[\frac{m}{\Omega\ mm^2}\right]$ sau $\left[\frac{mho \cdot m}{mm^2}\right]$:

$$\gamma = \frac{1}{\rho}. \tag{2.11}$$

Relația (2.9) se mai poate scrie deci:

$$R = \frac{l}{\gamma S}. \tag{2.12}$$

S-a constatat experimental că rezistivitatea materialelor conductoare variază cu temperatura (crește cu temperatura) după o relație de forma:

$$\rho_\theta = \rho_0[1 + \alpha(\theta - \theta_0)], \tag{2.13}$$

în care:

ρ_θ este rezistivitatea la o temperatură oarecare θ (°C);

ρ_0 — rezistivitatea dată la o temperatură cunoscută θ_0 (de obicei $\theta_0 = 20°C$);

α — coeficientul de temperatură al rezistivității.

Înmulțind ambii membri ai relației (2.13) cu raportul $\frac{l}{S}$ se obține:

$$R_\theta = R_0[1 + \alpha(\theta - \theta_0)], \tag{2.14}$$

în care R_0 este rezistența conductorului la temperatura θ, iar R_0 rezistența dată la temperatura cunoscută θ_0.

Din tabelul 2.1 se observă că materialele folosite în confecționarea rezistențelor electrice au coeficientul α foarte mic, deci ele nu-și variază practic rezistivitatea cu temperatura.

Aplicația 2.1. Care este intensitatea curentului absorbit de o rezistență de constantan având $l = 20$ m, $S = 2{,}5$ mm² și fiind supusă la o tensiune $U = 12$ V?

Răspuns:

Conform cu relația (2.9) și tabelul 2.1 rezistența este:

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{1}{2} \cdot \frac{20}{2{,}5} = 4\Omega$$

iar din relația (2.5) rezultă:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{12}{4} = 3\ A.$$

---

* Fiind o unitate „inversă" pentru ohm [$1/\Omega$] se citește ca termenul ohm însă invers: mho.

Aplicația 2.2. Să se determine căderea de tensiune U pe un conductor din aluminiu având $l = 680$ m, $S = 10$ mm² și care este străbătut de un curent $I = 40$ A?

Răspuns. Ca și în cazul precedent avem:

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{1}{34} \cdot \frac{680}{10} = 2\Omega$$

iar din relația (2.8) se obține:

$$U = RI = 2 \cdot 40 = 80 \text{ V}.$$

Aplicația 2.3. Ce lungime trebuie să aibă o rezistență $R = 40\Omega$ din sîrmă de constantan cu secțiunea $S = 1{,}5$ mm²?

Răspuns. Din relația (2.9) se deduce:

$$l = \frac{RS}{\rho} = \frac{40 \cdot 1{,}5}{0{,}4} = 150 \text{ m}.$$

Aplicația 2.4. Curentul debitat de o mașină electrică este $I_1 = 5$A la tensiunea $U_1 = 200$V; după un timp de funcționare, datorită încălzirii bobinajului deci datorită măririi rezistenței curentul a scăzut la valoarea $I_2 = 4$A, deși tensiunea a rămas neschimbată. Să se calculeze temperatura θ_2 la care a ajuns bobinajul după funcționare, știind că temperatura inițială este $\theta_1 = 20°C$, iar înfășurarea este confecționată din cupru.

Răspuns. Din legea lui Ohm se deduce:

$$R_1 = \frac{200}{5} = 40\Omega; \quad R_2 = \frac{200}{4} = 50\Omega.$$

Din relația (2.14) se poate scrie succesiv:

$$R_2 = R_1[1 + \alpha(\theta_2 - \theta_1)];$$
$$R_2 = R_1 + R_1\alpha\theta_2 - R_1\alpha\theta_1;$$
$$R_1\alpha\theta_2 = R_2 - R_1 + R_1\alpha\theta_1,$$

de unde rezultă în final ($\alpha_{Cu} = 4 \cdot 10^{-3}$ 1/°C — tabelul 2.1 —)

$$\theta_2 = \frac{R_2 - R_1}{R_1\alpha} + \theta_1 = \frac{50 - 40}{40 \cdot 4 \cdot 10^{-3}} + 20 = 82{,}5°C.$$

3. REZISTOARE FIXE ȘI REGLABILE

Rezistențele pentru obținerea unor efecte electrice se realizează sub forma unor elemente fizice numite *rezistoare*. Ele se confecționează în diverse variante constructive.

● **Rezistoare fixe.** Se realizează sub anumite valori fixe ale rezistenței electrice, cum ar fi de exemplu rezistoarele pentru fiare de călcat ($R = 44$ Ω) sau cele chimice folosite în radiofonie [R^* = 100 Ω, 500 Ω ... 1 kΩ, ... 8,2 kΩ ... 2,2 MΩ].

● **Rezistoare reglabile** sau **reostate.** Își pot modifica rezistența după dorință cu ajutorul unor manete, roți de manevră, butoane etc. Se realizează în două variante: *cu ploturi* sau *cu cursor*.

Reostatele cu ploturi permit variația discontinuă (în trepte) a rezistenței (fig. 2.3, *a*), iar cele cu cursor (fig. 2.3, *b*) asigură variația continuă a rezistenței.

---

* $1\text{k}\Omega = 10^3\Omega$; $1\text{M}\Omega = 10^3\text{k}\Omega = 10^6\Omega$.

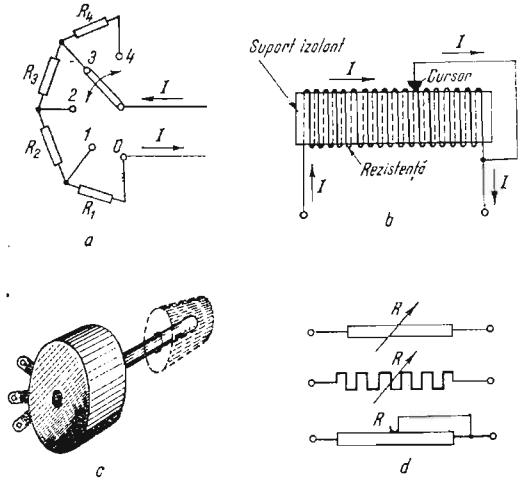


Fig. 2.3. Rezistoare reglabile:
a — reostat cu ploturi; *b* — reostat cu cursor; *c* — potențiometru tip radio; *d* — simboluri.

În categoria rezistoarelor reglabile se încadrează și potențiometrele folosite în circuitele electronice (fig. 2.3, *c*). În figura 2.3, *d* sînt prezentate unele simboluri folosite pentru rezistoare.

Atenție! Rezistorul este elementul fizic care este caracterizat de o serie de parametri ca: lungime, lățime, culoare, masă și bineînțeles rezistență.

C. ENERGIE ȘI PUTERE ELECTRICĂ. LEGEA JOULE-LENZ

1. ENERGIA ELECTRICĂ. LEGEA JOULE-LENZ

Dacă un rezistor avînd o rezistență R este parcurs de curentul I, rezistorul degajă permanent căldură care parțial este acumulată în masa sa, ridicîndu-i temperatura, și parțial este cedată mediului ambiant. Experimental s-a demonstrat că energia curentului electric, pe scurt energia electrică W, este proporțională cu rezistența $R(\Omega)$, cu pătratul intensității $I(\mathrm{A})$ și cu timpul $t(\mathrm{s})$ cît durează trecerea curentului electric:

$$W = RI^2t\ [\mathrm{J}] \tag{2.15}$$

Unitatea de măsură pentru energie în sistemul SI este joule-ul [J].

Energia respectivă se transformă integral în căldură, relația (2.15) definind în acest caz legea Joule-Lenz.

Energia electrică W sau căldura Q calculată cu relația (2.15) se poate exprima și în calorii (cal) ținînd seama de faptul că:

$$1\ \mathrm{cal} = 4{,}18\ \mathrm{J} \text{ sau } 1\ \mathrm{J} = 0{,}24\ \mathrm{cal}.$$

Rezultă deci:

$$Q = 0{,}24\ RI^2t\,[\text{cal}]. \tag{2.16}$$

Dacă se ține seama de faptul că $RI = U$ relația (2.15) se mai poate exprima și sub următoarele forme:

$$W = (RI)\,It = UIt \tag{2.17}$$

sau:

$$W = R\left(\frac{U}{R}\right)^2 t = \frac{U^2}{R}\,t. \tag{2.18}$$

2. PUTEREA ELECTRICĂ

După cum se știe, energia produsă sau transformată în unitatea de timp reprezintă puterea* P:

$$P = \frac{W}{t}\left[\frac{\text{J}}{\text{s}}\right]. \tag{2.19}$$

Rezultă că puterea electrică se obține* din relațiile (2.15), (2.17) sau (2.18) prin împărțirea cu timpul t:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{RI^2t}{t} = RI^2 \tag{2.20}$$

sau:

$$P = UI \tag{2.21}$$

sau

$$P = \frac{U^2}{R}. \tag{2.22}$$

Unitatea de măsură a puterii electrice rezultă din (2.19) ca fiind joule pe secundă [J/s] care în sistemul SI se numește watt (W)

$$1\ \text{W} = 1\ \frac{\text{J}}{\text{s}}.$$

În același timp din relația (2.21) se obține

$$1\ \text{W} = 1\ \text{VA},$$

adică puterea de un watt este puterea corespunzătoare unui curent de un amper la o diferență de potențial de un volt.

În practică, pentru măsurarea puterii se folosesc frecvent multiplii wattului: kilowatt (kW) și megawatt (MW).

Similar, pentru măsurarea energiei se folosește în afară de joule (wattsecunda) un multiplu al acestuia: kilowattora (kWh)

$$1\ \text{kWh} = 1\ 000\ \text{W} \times 3\ 600\ \text{s} = 3{,}6 \cdot 10^6\ \text{J}.$$

---

* Dacă energia variază în timp, astfel încît în timpul Δt energia variază cu ΔW, rezultă puterea corespunzătoare $P = \dfrac{\Delta W}{\Delta t}$, sau dacă timpul este infinit mic, rezultă $P = \dfrac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t}$.
Din această relație se poate deduce și expresia energiei W atunci cînd puterea P variază în timp: $W = \int P\mathrm{d}t$.

3. RANDAMENT

În utilizarea energiei electrice din întreaga putere P_t absorbită de la o sursă de energie, o parte din putere, Δp, se pierde prin efect Joule-Lenz (căldură) în conductoarele de legătură precum și în alte elemente ale instalației astfel că, practic, se folosește numai o parte din putere numită *putere utilă* P_u:

$$P_u = P_t - \Delta p. \tag{2.23}$$

Raportul dintre puterea utilă P_u și puterea totală P_t absorbită se numește *randamentul* instalației electrice și se notează de obicei cu η („ita"):

$$\eta = \frac{P_u}{P_t}. \tag{2.24}$$

Ținînd seama și de relația (2.23) randamentul mai poate fi exprimat și astfel:

$$\eta = \frac{P_t - \Delta p}{P_t} \tag{2.25}$$

sau

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + \Delta p}. \tag{2.26}$$

Dacă se are în vedere o anumită perioadă de timp t în care se consideră funcționarea unei anumite instalații electrice, prin înmulțirea puterilor din expresiile (2.24), (2.25) și (2.26) cu timpul t se obțin energiile corespunzătoare:

— energia totală: $W_t = P_t t$;
— energia utilă: $W_u = P_u t$;
— pierderea de energie: $\Delta W = \Delta p t$.

În acest caz randamentul η mai poate fi exprimat și sub următoarele forme:

$$\eta = \frac{W_u}{W_t} = \frac{W_t - \Delta W}{W_t} = \frac{W_u}{W_u + \Delta W}. \tag{2.27}$$

Observație. Din relațiile (2.23) ... (2.27) se constată că randamentul este întotdeauna subunitar ($\eta < 1$).

Aplicația 2.5. Să se calculeze energia electrică (kWh) absorbită de o rezistență $R = 60\ \Omega$ parcursă de un curent $I = 10$ A în timpul $t = 10$ min.

Răspuns:

$$t = 10 \text{ min} = 600 \text{ s}.$$

Conform cu relația (2.15):

$$W = RI^2t = 60 \cdot 10^2 \cdot 600 = 3\,600\,000 \text{ J} = 1 \text{ kWh}.$$

Aplicația 2.6. Să se calculeze echivalentul caloric al unui kilowattoră.

Răspuns:

$$1 \text{ kWh} = 3{,}6 \cdot 10^6 \text{ J}$$

$$1 \text{ J} = 0{,}24 \text{ cal}$$

deci:

$$1 \text{ kWh} = 3{,}6 \cdot 10^6 \cdot 0{,}24 = 864\,000 \text{ cal} = 864 \text{ kcal}.$$

Aplicația 2.7. Un cuptor electric având o rezistență $R = 3\ \Omega$ este alimentat la tensiunea $U = 120$ V.

Se cere:

1 — puterea absorbită de cuptor;
2 — energia consumată în 40 min de funcționare;
3 — energia utilă dacă în timpul de 40 min un bloc de oțel cu masa $m = 19$ kg este încălzit de la temperatura $t_1 = 15$°C la temperatura $t_2 = 1\,200$°C, căldura specifică a oțelului fiind $c = 0,11$ kcal/kg°C;
4 — randamentul cuptorului.

Răspuns.

1. Puterea absorbită P:

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{120^2}{3} = 4\,800\ \text{W} = 4,8\ \text{kW}.$$

2. Energia absorbită W:

$$W = Pt = 4\,800 \cdot 40 \cdot 60 = 11\,520\,000\ \text{J}.$$

$$W = \frac{11\,520\,000}{3,6 \cdot 10^6} = 3,2\ \text{kW h}^*.$$

3. Energia utilă W_u pentru încălzirea blocului de oțel este:

$$W_u = mc(t_2 - t_1) = 19\ \text{kg} \cdot 0,11\ \frac{\text{kcal}}{\text{kg°C}} \cdot 1\,185\text{°C} = 2\,480\ \text{kcal}.$$

Conform rezultatului din aplicația precedentă se poate scrie:

$$W_u = \frac{2\,480\ \text{kcal}}{864\ \text{kcal/kWh}} = 2,87\ \text{kWh}.$$

4. Randamentul cuptorului este:

$$\eta = \frac{W_u}{W} = \frac{2,87\ \text{kWh}}{3,2\ \text{kWh}} = 0,9 = 90\%.$$

D. REȚELE DE CURENT CONTINUU

1. CIRCUIT ÎNCHIS. TENSIUNE ELECTROMOTOARE

În capitolul precedent s-au studiat trecerea curentului electric printr-un conductor și fenomenele legate de acesta. În realitate curentul electric poate circula numai într-un circuit închis (fig. 2.4) care să cuprindă cel puțin o sursă de energie S și cel puțin un conductor care să închidă circuitul parcurs de curent.

Sursa produce la bornele sale A și B o tensiune E care dă naștere în conductorul de rezistență R unui curent electric de intensitate I, în conformitate cu legea lui Ohm $\left[I = \frac{U}{R}\right]$.

---

* Se putea observa mai simplu că: 40 min $= \frac{40}{60}$ ore $= \frac{2}{3}$ ore, deci $W = P \cdot t = 4,8\text{kW} \times \frac{2}{3}$ ore $= 3,2$ kWh.

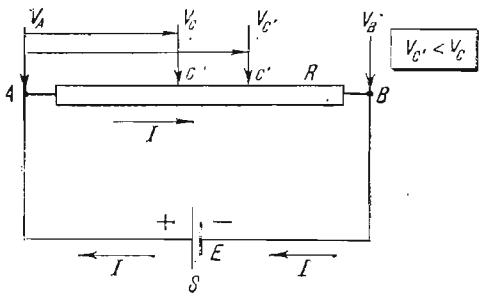


Fig. 2.4. Circuit electric închis.

La rîndul său curentul electric străbătînd anumite porțiuni din conductor (circuit) dă naștere în diversele puncte ale circuitului la diverse potențiale electrice.

În adevăr, considerînd că tensiunea la bornele sursei este:

$$E = V_A - V_B \qquad (2.28)$$

(V_A și V_B fiind potențialele bornelor de+respectiv de— ale sursei S) căderea de tensiune pe porțiunea $A - C$ (fig. 2.4) este dată de relația:

$$\Delta U_{AC} = V_A - V_C = R_{AC}I \qquad (2.29)$$

în care s-a notat cu R_{AC} rezistența conductorului între punctele A și C. În consecință, potențialul unui punct oarecare C de-a lungul circuitului va fi:

$$V_C = V_A - R_{AC}I \qquad (2.30)$$

Dacă punctul C se deplasează în sensul curentului, de exemplu în C', potențialul noului punct C' va fi:

$$V_{C'} = V_A - R_{AC'}I. \qquad (2.31)$$

Deoarece:

$$R_{AC'} > R_{AC} \qquad (2.32)$$

rezultă că

$$V_{C'} < V_C. \qquad (2.33)$$

În concluzie se poate constata că potențialele punctelor de-a lungul circuitului variază liniar * scăzînd continuu pînă la atingerea potențialului V_B (borna minus).

Graficul funcției $V_C = f(R_{AC})$ în care punctul C are o poziție variabilă este prezentat în figura 2.5.

Se constată că sursa S produce diferența de potențial (tensiunea) $E = V_A - V_B$, — ridică potențialul de la V_B la V_A — care compensează apoi scăderea potențialului — căderea de tensiune — de-a lungul circuitului.

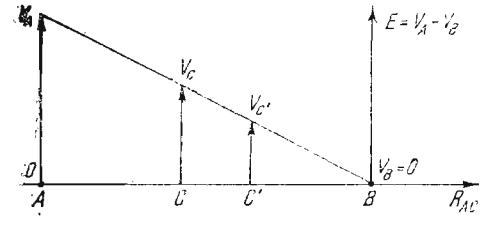


Fig. 2.5. Variația potențialelor într-o rezistență.

Tensiunea E a sursei se numește *tensiune electromotoare* (mișcă electronii) și se măsoară, bineînțeles, tot în volți (V).

În figura 2.4 a fost prezentată cea mai simplă formă de rețea electrică de curent continuu.

* Dacă în relația (2.30) se notează $V_C = y$; $V_A = y_0$; $I = K$ și $R_{AC} = x$, această relație devine:

$$y = y_0 - Kx$$

ecuație care reprezintă în planul $y = f(x)$ o dreaptă avînd panta egală cu $-K$, iar ordonata la origine egală cu y_0.

2. STRUCTURA REȚELELOR ELECTRICE

În general o rețea electrică de curent continuu reprezintă un ansamblu de rezistoare de rezistențe R_1, R_2 ... R_{14} și de surse având tensiunile electromotoare E_1, E_2 ... E_6 legate între ele în diverse moduri (exemplu fig. 2.6).

Într-o asemenea rețea se disting *noduri* și *laturi*:

— se numește *nod* punctul în care se întîlnesc cel puțin trei conductoare (în figura 2.6 se disting nodurile n_1, n_2 ... n_7);

— se numește *latură* un ansamblu de elemente — surse și rezistoare — legate în serie între două noduri (în fig. 2.6 se disting laturile l_1, l_2 ... l_{12}).

De exemplu latura l_1 conține înseriate sursa cu tensiunea E_1 și rezistoarele de rezistență R_1 și R_2 ș.a.m.d.

Tensiunile electromotoare dau naștere în rețea la o serie de curenți electrici I_1, I_2 ... I_{12} care străbat laturile rețelei în diverse moduri și pe baza unor legi bine precizate.

Atenție! *În toate punctele unei laturi intensitatea curentului este aceeași.*

Observație. Rezistoarele prevăzute în rețea reprezintă în general consumatori de energie deși unele dintre ele constituie receptoare de energie, care produc lucru util — (de exemplu: lămpi, motoare, reșouri etc.) iar altele produc numai pierdere de putere (de exemplu: conductoare de legătură, reostate de reglare — modificare — a curentului etc.).

O rețea care nu conține surse electromotoare se numește *rețea pasivă*, adică luată separat nu este străbătută de curenți electrici. Din această cauză rezistoarele* se numesc elemente *pasive*.

Corespunzător, cînd există surse care activează circulația curentului electric rețelele se numesc *active*.

Procedeele tehnice de determinare ale curenților ce circulă prin diversele laturi ale unei rețele electrice date se numesc *metode de rezolvare a rețelelor*.

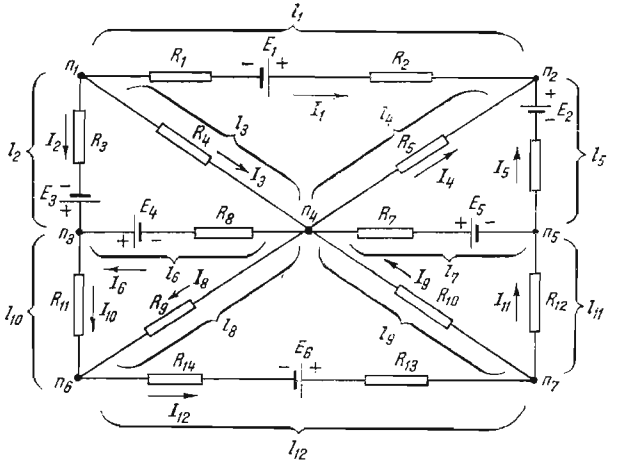


Fig. 2.6. Rețea electrică generală.

* Ca și alte elemente ce se vor întîlni în rețelele de curent alternativ (bobine, condensatoare etc.).

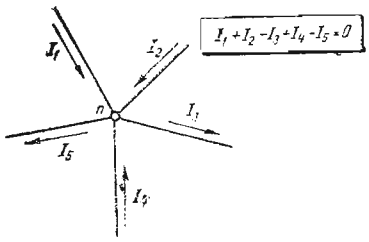


Fig. 2.7. Nodul unei rețele electrice.

E. TEOREMELE LUI KIRCHHOFF

Pentru rezolvarea rețelelor electrice complexe se folosesc, pe lîngă legea lui Ohm, și teoremele (legile) lui Kirchhoff (citește „Kirhof").

1. TEOREMA I A LUI KIRCHHOFF

Considerînd un nod n al unei rețele complexe oarecare (fig. 2.7 în care se întîlnesc un număr oarecare de laturi — de exemplu cinci — se demonstrează prima teoremă a lui Kirchhoff și anume că suma curenților care intră în nod $(I_1 + I_2 + I_4)$ este egală cu suma curenților care ies din nod $(I_3 + I_5)$.

$$I_1 + I_2 + I_4 = I_3 + I_5. \tag{2.34}$$

O asemenea constatare ne apare logică ținînd seama de principiul conservării sarcinilor electrice în nodul considerat, adică: cantitatea de electricitate (numărul de electroni $I_1\,dt + I_2\,dt + I_4\,dt$ care intră în nod în timpul dt este egal cu cantitatea de electricitate $I_3\,dt + I_5\,dt$ care iese din nod în același timp:

$$dQ_1 + dQ_2 + dQ_4 = dQ_3 + dQ_5. \tag{2.35}$$

Relația (2.34) mai poate fi pusă și sub forma:

$$I_1 + I_2 + (-I_3) + I_4 + (-I_5) = 0. \tag{2.36}$$

Sub această formă, convenind să se considere pozitivi curenții care intră în nod și negativi curenții care ies din nod, teorema I a lui Kirchhoff se poate enunța astfel: *suma algebrică a curenților care intră într-un nod al unei rețele electrice este egală cu zero*:

$$\Sigma I = 0. \tag{2.37}$$

2. TEOREMA A II-A A LUI KIRCHHOFF

Pentru a putea enunța această teoremă sînt necesare unele precizări și convenții ce trebuie avute în vedere;

● O succesiune de laturi ale unei rețele complexe care formează un circuit ce se închide — ajunge în punctul din care a plecat — se numește *circuit închis, ochi* sau *buclă* a rețelei. De exemplu, circuitul $A—B—C—D \ldots A$ (fig. 2.8) constituie un circuit închis.

● Să presupunem că în circuitul din figura 2.8 curenții I_1, I_2, I_3 și I_4 din cele patru laturi ale circuitului închis considerat au sensurile de circulație din figură, și că se admite un anumit sens (arbitrar) de parcurgere al acestui circuit (sensul trigonometric pozitiv) adică $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow G \rightarrow \rightarrow H \rightarrow A$.

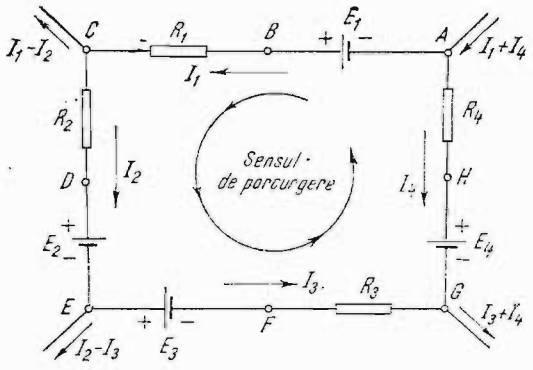


Fig. 2.8. Circuit închis (buclă) al unei rețele.

Se stabilesc următoarele convenții:

● Dacă sensul de parcurgere al circuitului coincide cu sensul de debitare al sursei (trece prin sursă de la minus spre plus) atunci sursa se consideră generatoare și i se atribuie semnul + (în figura 2.8 avem $+E_1$ și $+E_4$), iar dacă situația este inversă sursa se consideră receptoare și i se atribuie semnul — (în figura 2.8 avem $-E_2$ și $-E_3$).

● Dacă sensul de parcurgere a circuitului coincide cu sensul curentului în latura respectivă, căderea de tensiune RI pe rezistență este considerată pozitivă atribuindu-i-se deci semnul + (în figura 2.8 avem $+R_1I_1$, $+R_2I_2$ și $+R_3I_3$) iar dacă situația este inversă căderea de tensiune este considerată negativă, atribuindu-i-se deci semnul — (în figura 2.8 avem $-R_4I_4$).

Adoptînd aceste convenții, teorema a II-a a lui Kirchhoff se enunță astfel: într-un circuit electric închis suma algebrică a tensiunilor electromotoare este egală cu suma algebrică a căderilor de tensiune.

Pentru exemplul din figura 2.8 și conform celor stabilite se poate scrie:

$$E_1 - E_2 - R_3 + E_4 = R_1I_1 + R_2I_2 + R_3I_3 - R_4I_4 \tag{2.38}$$

sau într-o formă generală:

$$\Sigma E = \Sigma RI. \tag{2.39}$$

Pentru demonstrarea acestei teoreme se va nota cu V_A, V_B, V_C ... V_H potențialele punctelor* A, B, C ... H din circuitul închis din figura 2.8 și pe baza celor cunoscute se vor scrie succesiv următoarele ecuații:

$$V_A - V_B = -(V_B - V_A) = -E_1 \tag{2.40}_1$$

$$V_B - V_C = R_1I_1 \tag{2.40}_2$$

$$V_C - V_D = R_2I_2 \tag{2.40}_3$$

$$V_D - V_F = E_2 \tag{2.40}_4$$

$$V_E - V_F = E_3 \tag{2.40}_5$$

$$V_F - V_G = R_3I_3 \tag{2.40}_6$$

$$V_G - V_H = -(V_H - V_G) = -E_4 \tag{2.40}_7$$

$$V_H - V_A = -(V_A - V_H) = -R_4I_4. \tag{2.40}_8$$

* Atenție! Numai punctele A, C, E și G sînt noduri.

Adunînd cele opt relații membru cu membru se observă că suma termenilor din membrul întîi este nulă ($V_A - V_B + V_B - V_C + V_C - V_D \ldots - V_A = 0$) deci și suma termenilor din membrul doi este de asemenea nulă:

$$0 = -E_1 + R_1I_1 + R_2I_2 + E_2 + E_3 + R_3I_3 - E_4 - R_4I_4$$

sau:

$$E_1 - E_2 - E_3 + E_4 = R_1I_1 + R_2I_2 + R_3I_3 - R_4I_4$$

astfel că teorema a II-a lui Kirchhoff este demonstrată — s-a obținut relația (2.38).

F. SURSE ȘI RECEPTOARE. METODE DE CONECTARE

1. SURSE ELECTRICE

În paragrafele precedente s-a arătat că o sursă producătoare de curent continuu (generator de curent continuu — dinam, v. cap. 6 — sau baterie de acumulatoare) este caracterizată printr-o tensiune electromotoare E. Această tensiune poate fi măsurată la bornele sursei numai dacă aceasta funcționează în gol (nu debitează curent). La funcționarea în sarcină, datorită unei rezistențe interne r a sursei, tensiunea U la borne este mai mică decît tensiunea electromotoare E datorită unei căderi de tensiune interne ΔU. În adevăr, în această situație (fig. 2.9) curentul debitat de sursă conform legii lui Ohm este:

$$I = \frac{E}{R + r} \tag{2.41}$$

de unde rezultă tensiunea U la borne *:

$$U = E - rI = E - r\frac{E}{R + r} = \frac{ER}{R + r}. \tag{2.42}$$

Ținînd seama de relația (2.41) se obține în definitiv:

$$U = RI. \tag{2.43}$$

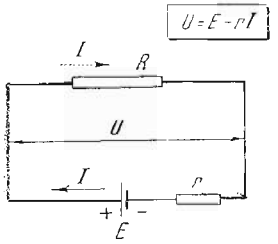


Fig. 2.9. Sursă cu rezistență internă.

Observație. Din relația (2.42) se observă că pentru $I = 0 \Rightarrow U = E$.

După cum s-a mai arătat sursele electrice de producere a curentului continuu se realizează fie sub forma unor mașini electrice rotative — dinam — care produc curentul electric la diverse tensiuni (de la cîțiva volți pînă la cîteva sute de volți) fie sub forma unor pile sau acumulatoare care conțin energia electrică acumulată sub o formă chimică.

* Conform convențiilor stabilite în paragraful precedent.

2. RANDAMENTUL SURSELOR ELECTRICE

Relația (2.42) mai poate fi scrisă sub forma

$$E = U + rI. \tag{2.44}$$

Înmulțind această relație cu I se obține:

$$EI = UI + rI^2. \tag{2.45}$$

Această expresie reprezintă bilanțul puterilor electrice care intervin într-o asemenea situație:

$EI = P_s$ este puterea debitată de sursă;

$UI = P_u$ — puterea debitată în circuitul exterior;

$rI^2 = \Delta P$ — puterea pierdută în rezistența internă.

Observație. Pierderea de putere ΔP se transformă în căldură, motiv pentru care în funcționare sursa se încălzește.

Din relația (2.45) se poate deduce randamentul sursei electrice:

$$\eta = \frac{P_u}{P_s} = \frac{UI}{EI} = \frac{U}{E}. \tag{2.46}$$

3. PILE ȘI ACUMULATOARE ELECTRICE

a. Tensiunea electromotoare electrolitică

Dacă se cufundă un electrod metalic într-un electrolit se constată că între electrod și electrolit apare o diferență de potențial care depinde de natura electrodului, a electrolitului și de concentrația în ioni a electrolitului. Această diferență de potențial numită *diferență de potențial electrolitică* se explică prin faptul că, fie că ionii pozitivi ai electrolitului trec în electrodul de metal, acesta devenind pozitiv față de electrolit, fie invers, caz în care metalul devine negativ față de electrolit.

În tabelul 2.2 sînt indicate diferențele de potențial electrolitice e ale unor metale.

Tabelul 2.2

Metalul	e[V]	Metalul	e[V]
Potasiu (K)	— 2,92	Plumb (Pb)	— 0,12
Sodiu (Na)	— 2,71	Hidrogen (H)	0
Zinc (Zn)	— 0,76	Cupru (Cu)	+ 0,34
Fier (Fe)	— 0,43	Argint (Ag)	+ 0,8
Cadmiu (Cd)	— 0,40	Mercur (Hg)	+ 0,86

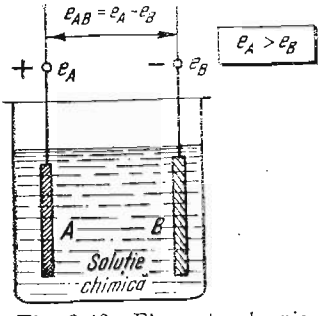


Fig. 2.10. Element galvanic.

Dacă într-un electrolit C (fig. 2.10) se introduc doi electrozi metalici diferiți A și B avînd diferența de potențial electrolitic e_A și e_B, între cei doi electrozi apare o diferență de potențial:

$$e_{AB} = e_A - e_B. \qquad (2.47)$$

Ca urmare, legînd între ei cei doi electrozi ia naștere un curent electric care circulă în exterior de la electrodul cu potențial mai ridicat (pozitiv) spre cel cu potențial mai coborît (negativ). S-a creat astfel o sursă de energie electrică care transformă energia chimică în energie electrică. Aceste surse se numesc elemente galvanice și se împart în două mari categorii: *pile electrice* și *acumulatoare.*

Diferența de porențial e_{AB} se numește *tensiune electromotoare electrolitică.*

De exemplu tensiunea electromotoare a unui element galvanic avînd electrozi din cupru ($e_A = +0{,}43$ V) și zinc ($e_B = -0{,}76$ V) va avea tensiunea electromotoare:

$$e_{AB} = e_A - e_B = +0{,}34 - (-0{,}76) = 1{,}1 \text{ V}.$$

Observație. Dacă cei doi electrozi sînt realizați din același material tensiunea electromotoare electrolitică este nulă deoarece diferențele de potențial parțiale sînt egale și opuse.

b. Pile electrice

Sînt elemente galvanice la care în urma fenomenelor de electroliză produse de curentul debitat electrozii și electrolitul se uzează complet și, ca atare, aceste elemente nu pot fi refolosite. Dintre numeroasele tipuri de pile electrice se menționează cele umede ca, de exemplu, elementul Volta cu electrozi din zinc și cupru ($e_{AB} = 1{,}1$ V) cufundați într-o soluție de acid sulfuric precum și cele uscate realizate sub forma unui pahar de zinc în care se introduce un electrod de cărbune într-o soluție de amoniac NH_4Cl ($e_{AB} = 1{,}5$ V). Pilele uscate se întîlnesc în comerț sub denumirea de baterii de lanternă avînd 1,5 V, 4,5 V (trei baterii legate în serie), 9 V etc. și sînt fabricate în țara noastră la întreprinderea EL-BA (Electrobanat) — Timișoara.

c. Acumulatoare electrice

Sînt elemente galvanice reversibile, adică la care fenomenele chimice care au loc în timpul debitării curentului (descărcarea acumulatorului) se produc în sens invers atunci cînd prin element trece un curent de sens contrar curentului de descărcare (încărcarea acumulatorului). Acumulatoarele sînt de două tipuri principale: *acide* și *alcaline.*

Acumulatoarele acide au electrozii din plumb și respectiv oxid de plumb, iar ca electrolit folosesc soluție de acid sulfuric. Tensiunea electromotoare a unui element este de 2 ... 2,2 V, minima fiind de 1,85 V. Descărcarea sub

această limită nu este admisă deoarece elementul se strică (se sulfatează). În regim de încărcare tensiunea pe element crește la 2,6—2,7 V producîndu-se la sfîrșitul încărcării o degajare de bule de hidrogen; se spune că acumulatorul „fierbe".

Acumulatoarele se construiesc sub forma unor baterii formate din 3, 6, 12 ... elemente avînd astfel tensiuni nominale de 6, 12, 24, ... volți.

De regulă generală acumulatoarele sînt folosite în tampon cu o sursă de curent continuu — dinam sau redresor — ca de exemplu pe autovehicule; în acest caz la pornire se absoarbe din baterie energia electrică necesară pornirii, iar în funcționare, alimentarea se face din dinam încărcîndu-se concomitent și bateria de acumulatoare.

Acumulatoarele alcaline au electrozi din fier și nichel, iar ca electrolit se folosește hidratul de potasiu (KOH). Aceste tipuri de acumulatoare sînt mai robuste și mai ușoare pentru aceeași capacitate, fiind în schimb mai scumpe.

Capacitatea unui acumulator se măsoară în amper-oră (Ah) care reprezintă produsul între curentul debitat și timpul în care acest curent poate fi debitat. Se consideră ca curent nominal I_n al unei baterii curentul corespunzător unei funcționări de 10 ore.

De exemplu, o baterie tip auto de $U_n = 12$ V are capacitatea $C = 60$ Ah, ceea ce corespunde unui curent nominal $I_n = 6$ A. Aceasta înseamnă că în funcționare normală (nominală) o asemenea baterie poate debita o putere $P_n = U_n I_n = 12 \times 6 = 72$ W timp de 10 ore.

Observație. Pentru un timp foarte scurt (2 — 3 s) o baterie poate debita curenți de 8 — 10 ori I_n. În țara noastră se fabrică acumulatoare acide la Întreprinderea Acumulatorul — București.

4. RECEPTOARE

Sarcinile (receptoarele) exterioare al circuitelor de curent continuu sînt în principal rezistoarele care, după cum s-a arătat, fiind caracterizate printr-o rezistență R produc:

— căderea de tensiune $\Delta U = RI$,

— pierderea de putere $\Delta P = RI^2$,

în care I este curentul ce străbate rezistorul respectiv. În subsidiar, tot ca receptoare de curent continuu sînt considerate și sursele străbătute de curent în sens invers sensului lor de debitare, adică, de exemplu, bateriile de acumulatoare funcționînd în regim de încărcare.

5. LEGAREA REZISTOARELOR

a. Legarea în serie

Considerînd pe o latură a unei rețele complexe mai multe rezistoare avînd rezistențele R_1, R_2, R_3 ... R_n legate în serie (fig. 2.11, *a*) ele vor fi străbătute de același curent I. Acest curent va produce în rezistoare căderile de tensiune:

$$U_1 = R_1 I \quad U_2 = R_2 I; \quad \ldots U_n = R_n I. \tag{2.48}$$

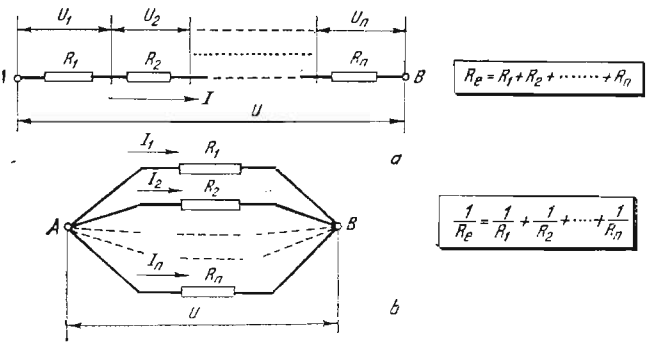


Fig. 2.11. Legarea rezistoarelor:
a — în serie; *b* — în paralel.

Suma acestor căderi de tensiune este egală cu tensiunea totală U aplicată grupului de rezistoare:

$$U = U_1 + U_2 + \ldots + U_n = R_1 I + R_2 I + \ldots + R_n I = \\ = (R_1 + R_2 + \ldots + R_n) I. \tag{2.49}$$

Conform legii lui Ohm rezistența echivalentă R_e este egală cu raportul dintre U și I. Astfel din relația (2.49) rezultă:

$$R_e = \frac{U}{I} = R_1 + R_2 + \ldots + R_n. \tag{2.50}$$

Rezistența echivalentă R_e a mai multor rezistoare legate în serie avînd rezistențele R_1, $R_2 \ldots R_n$ este egală cu suma rezistențelor respective.

În cazul a n rezistențe identice R legate în serie rezistența echivalentă este:

$$R_e = nR. \tag{2.51}$$

Atenție! Rezistența echivalentă este mai mare decît cea mai mare rezistență parțială.

b. Legarea în paralel

Considerînd mai multe rezistoare avînd rezistențele R_1, $R_2 \ldots R_n$ legate în paralel (fig. 2.11, *b*) acestea, fiind supuse tensiunii comune U, vor fi parcurse de curenții I_1, $I_2 \ldots I_n$ definiți de legea lui Ohm:

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; \quad I_2 = \frac{U}{R_2}; \quad \ldots I_n = \frac{U}{R_n}. \tag{2.52}$$

Conform primei teoreme a lui Kirchhoff curentul total I absorbit de cele n rezistențe va fi egal cu suma curenților ce străbat fezistențele respective

$$I = I_1 + I_2 + \ldots + I_n. \tag{2.53}$$

Observație. Această relație este valabilă și în nodul A și în nodul B al rețelei.

Înlocuind în (2.53) valorile curenților din relațiile (2.52) se obține:

$$I = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \ldots + \frac{U}{R_n} = U\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots + \frac{1}{R_n}\right) = U\frac{1}{R_e} \qquad (2.54)$$

de unde, prin identificare, se obține:

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots + \frac{1}{R_n}. \qquad (2.55)$$

Valoarea inversă a rezistenței echivalente R_e a mai multor rezistoare legate în paralel și având rezistențele R_1, $R_2 \ldots R_n$ este egală cu suma valorilor inverse ale rezistențelor respective.

În cazul a n rezistențe identice R legate în paralel, rezistența echivalentă R_e va fi dată de expresia:

$$\frac{1}{R_e} = \frac{n}{R} \quad \text{sau} \quad R_e = \frac{R}{n}.$$

Atenție! Rezistența echivalentă este mai mică decît cea mai mică rezistență parțială.

c. Legarea mixtă

Este o legare combinată serie-paralel. Pentru determinarea rezistenței echivalente R_e se determină valoarea rezistențelor echivalente ale fiecărui grup de rezistențe paralele — conform relației (2.55) obținîndu-se un număr oarecare de rezistențe (reale și echivalente) care sînt legate în serie, adică se adună — conform relației (2.50) ș.a.m.d.

Aplicația 2.8. Să se calculeze rezistența echivalentă a schemei de rezistoare din figura 2.12, *a*.

Răspuns.

— Se calculează rezistența echivalentă R_6 a rezistenței $R_2 = 20\Omega$ în paralel cu $R_3 = 30\Omega$ — conform relației (2.55):

$$\frac{1}{R_6} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}; \qquad R_6 = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = \frac{20 \cdot 30}{20 + 30} = 12\Omega.$$

— S-a obținut schema echivalentă din figura 2.12, *b* în care R_1 este legat în serie cu R_6, astfel că în conformitate cu relația (2.50) rezultă:

$$R_7 = R_1 + R_6 = 28 + 12 = 40\ \Omega.$$

— Se observă că (fig. 2.12, *c*) R_7 este legat în paralel cu R_4, astfel că rezistența echivalentă R_8 este:

$$R_8 = \frac{R_4 R_7}{R_4 + R_7} = \frac{40 \cdot 60}{40 + 60} = 24\ \Omega.$$

— În sfîrșit R_8 este legată în serie cu R_5 (fig. 2.12, *d*) astfel că rezultă în final rezistența echivalentă totală:

$$R_e = R_8 + R_5 = 24 + 11 = 35\ \Omega.$$

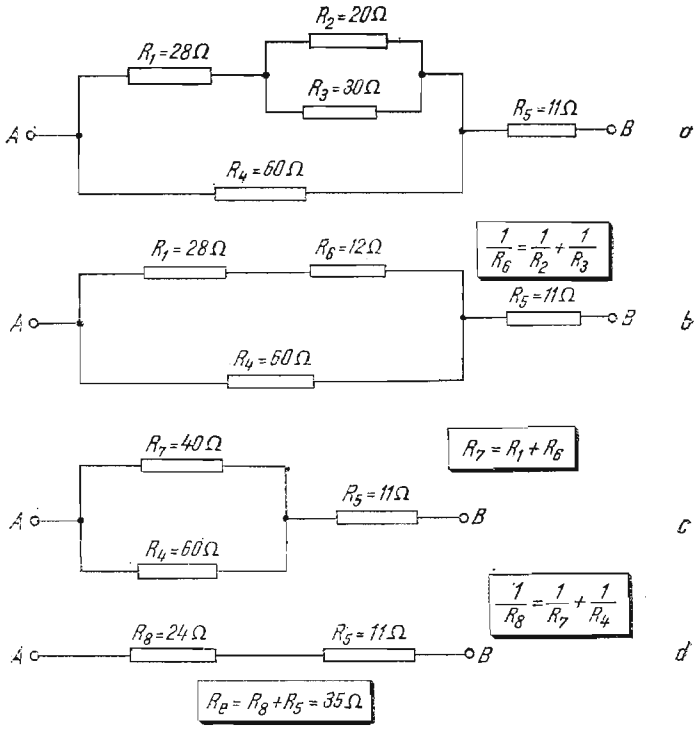


Fig. 2.12. Legarea mixtă a rezistoarelor — aplicație:
a — schema inițială; *b*, *c*, *d* — scheme echivalente.

6. LEGAREA SURSELOR ELECTRICE

a. Legarea în serie

În cazul în care se doresc tensiuni mai mari, sursele se leagă în serie (fig. 2.13, *a*). Sursa echivalentă astfel obținută va avea:

— tensiunea echivalentă E_e egală cu suma tensiunilor parțiale E_1, $E_2 \ldots E_n$:

$$E_e = E_1 + E_2 + \ldots + E_n; \tag{2.56}$$

— rezistența internă echivalentă r_e egală cu suma rezistențelor interne parțiale r_1, $r_2 \ldots r_n$:

$$r_e = r_1 + r_2 + \ldots + r_n. \tag{2.57}$$

De obicei se leagă în serie n acumulatoare identice de tensiune electromotoare E și capacitate C și se obține o baterie cu tensiunea $E_e = nE$ și rezistență internă $r_e = nr$ însă de aceeași capacitate C, întrucît curentul nominal rămîne neschimbat.

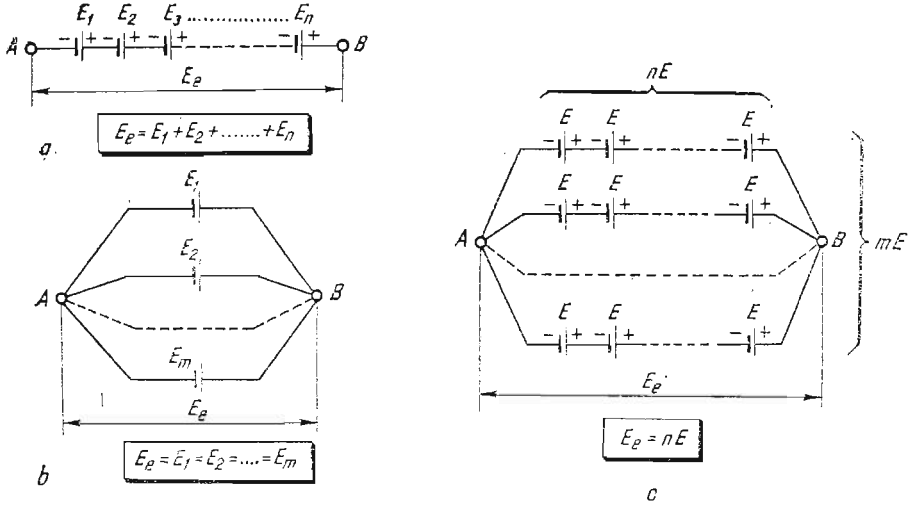


Fig. 2.13. Legarea surselor electrice:
a — în serie; *b* — în paralel; *c* — mixtă.

De exemplu, conectînd în serie 10 acumulatoare de 12 V și 60 Ah se obține o baterie de 120 V și 60 Ah.

Atenție! Deși curentul nominal al bateriei a rămas același cu acela al unui singur acumulator ($I_n = 6$ A) în schimb, datorită creșterii tensiunii, puterea nominală a crescut de 10 ori.

$$(P_n = E_n I_n = 120 \times 6 = 720\,\text{W}).$$

b. Legarea în paralel

Dacă sînt necesari curenți mai mari, acumulatoarele se leagă în paralel (fig. 2.13, *b*).

Observație. Dacă la legarea în serie se pot folosi surse de tensiuni diferite, la legarea în paralel este obligatorie folosirea acumulatoarelor cu aceeași tensiune electromotoare — de preferință identice.

Legînd în paralel m acumulatoare identice de tensiune E și capacitate C se obține o baterie cu aceeași tensiune $E_e = E$ însă cu o capacitate de m ori mai mare ($C_e = mC$) și o rezistență internă $\left(r_e = \frac{r}{m}\right)$ de m ori mai mică.

De exemplu, conectînd în paralel 10 acumulatoare de 12 V și Ah se obține o baterie de 12 V și 600 Ah.

Atenție! Deși tensiunea nominală a bateriei a rămas aceeași ($E_n = 12$ V) în schimb, datorită creșterii curentului, puterea nominală a crescut de 10 ori ($P_n = E_n I_n = 12 \times 60 = 720$ W).

Așadar, *puterea ce o poate furniza bateria nu depinde de modul de conectare al acumulatoarelor.*

c. Legarea mixtă

Reprezintă o legare combinată serie-paralel. Considerînd că se leagă mai multe acumulatoare identice de tensiune electromotoare E, capacitate C, curent nominal I, putere P și rezistență internă r într-un montaj mixt cuprinzînd m ramuri în paralel, fiecare avînd cîte n acumulatoare legate în serie, (fig. 2.13, *c*) se obține o baterie echivalentă cu următoarele caracteristici:

— tensiunea electromotoare echivalentă:

$$E_e = nE; \tag{2.58}$$

— capacitatea echivalentă;

$$C_e = mC; \tag{2.59}$$

— rezistența echivalentă:

$$r_e = \frac{n}{m} r; \tag{2.60}$$

— numărul de acumulatoare:

$$a = mn; \tag{2.61}$$

— curentul nominal echivalent:

$$I_e = mI; \tag{2.62}$$

— puterea nominală echivalentă:

$$P_e = mn\ P. \tag{2.63}$$

G. CALCULUL REȚELELOR DE CURENT CONTINUU

Pentru calculul rețelelor de curent continuu se pot folosi mai multe metode de rezolvare aplicîndu-se cea care se consideră cea mai comodă pentru o rețea dată. În cele ce urmează se vor prezenta cîteva metode de calcul dintre cele mai uzuale.

Se precizează faptul că în principiu a rezolva o rețea înseamnă a determina curenții în diversele laturi eventual căderile de tensiune între anumite puncte ale rețelei dîndu-se sursele (tensiunile E_1, E_2 ...) și consumatorii (rezistențele R_1, R_2 ...).

1. METODA TEOREMELOR LUI KIRCHHOFF

Considerînd o rețea electrică oarecare, în această rețea există n noduri și l laturi.

Deoarece fiecare latură este parcursă de cîte un curent înseamnă că în rețea vor exista l curenți, deci sînt necesare l ecuații cu l (curenți) necunoscute.

În acest scop se procedează astfel:

— Se notează cu I_1, I_2 ... I_l curenții în laturi.

Atenție! Deoarece nu se cunosc sensurile acestor curenți, inițial aceste sensuri se aleg arbitrar.

— Se scrie teorema I a lui Kirchhoff pentru $n - 1$ noduri, deci se obțin $n-1$ ecuații între curenți, aceste ecuații fiind de forma:

$$\Sigma I = 0 \ (n - 1 \text{ ecuații}). \tag{2.64}$$

— Se aleg în rețea $l - n + 1$ circuite închise independente în care se scrie teorema a II-a a lui Kirchhoff, deci se obțin $l - n + 1$ ecuații între curenți, tensiuni electromotoare și rezistențe, de forma:

$$\Sigma E = \Sigma RI \quad (l - n + 1 \text{ ecuații}). \tag{2.65}$$

— Numărul total de ecuații din (2.64) și (2.65) rezultă:

$$n - 1 + l - n + 1 = l \text{ ecuații},$$

adică un număr de ecuații egal cu numărul de curenți necunoscuți.

— Prin rezolvarea sistemelor de ecuații (2.64) și (2.65) se deduc curenții I_1, I_2 ... I_l.

— Curenții rezultați din calcul cu semnul + (pozitiv) au sensul stabilit inițial, iar cei cu semnul — (minus) au sensul invers celui stabilit inițial.

Aplicația 2.9. Să se determine curenții din rețeaua din figura 2.14 cunoscînd: $E_1 = 48$ V; $E_2 = 19$ V; $R_1 = 2\Omega$; $R_2 = 3\Omega$; $R_3 = 4\Omega$. Să se întocmească bilanțul energetic.

Răspuns. Deoarece rețeaua are $n = 2$ noduri (A și B) și $l = 3$ laturi se vor scrie $n - 1 = 1$ ecuația din teorema I a lui Kirchhoff și $l - n + 1 = 2$ ecuații din teorema a II-a a lui Kirchhoff.

Astfel, se va scrie teorema I pentru nodul A și teorema II pentru circuitele închise $BCAB$ și $BDAB$ parcurse în sensul indicat de litere, curenții I_1, I_2 și I_3 avînd sensurile arbitrare indicate punctat în figura 2.14.

Se obține astfel un sistem de trei ecuații independente cu trei necunoscute:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0; \tag{2.66}_1$$

$$R_1 I_1 + R_3 I_3 = E_1; \tag{2.66}$$

$$+ R_3 I_3 + R_2 I_2 = E_2. \tag{2.66}$$

Sau înlocuind cu valorile numerice rezultă:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0;$$
$$2I_1 + 4I_3 = 48;$$
$$4I_3 + 3I_2 = 19.$$

Rezolvînd acest sistem de ecuații printr-una din metodele cunoscute din algebră se obține:

$$I_1 = 10 \text{ A}; \quad I_2 = -3 \text{ A}; \quad I_3 = 7 \text{ A}.$$

Observație. Curenții I_1 și I_3 au sensurile indicate în figura 2.14, în timp ce I_2 are sens contrar, adică sursa E_2 absoarbe curent.

— Pentru întocmirea bilanțului energetic se ține seama că numai sursa de tensiune E_1 debitează puterea P_d:

$$P_d = E_1 I_1 = 48 \times 10 = 480 \text{ W},$$

iar consumatorii sînt R_1, R_2, R_3 și E_2, deci puterile consumate sînt succesiv:

$$P_{C1} = R_1 I_1^2 = 2 \cdot 10^2 = 200 \text{ W};$$
$$P_{C2} = R_2 I_2^2 = 3 \cdot (-3)^3 = 27 \text{ W};$$
$$P_{C3} = R_3 I_3^2 = 4 \cdot 7^2 = 196 \text{ W};$$
$$P_{C4} = E_2 I_2 = 19 \cdot 3 = 57 \text{ W}.$$

$$P_C = P_{C1} + P_{C2} + P_{C3} + P_{C4} = 480 \text{ W}$$

Rezultă că bilanțul energetic se verifică: $P_d = P_c = 480$ W.

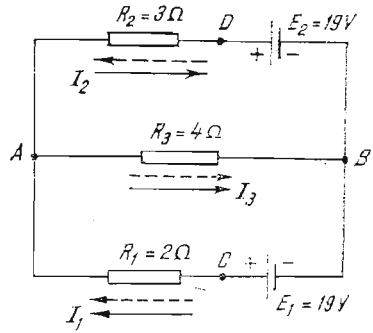


Fig. 2.14. Rezolvarea unei rețele electrice prin metoda teoremelor lui Kirchhoff (aplicația 2.9).

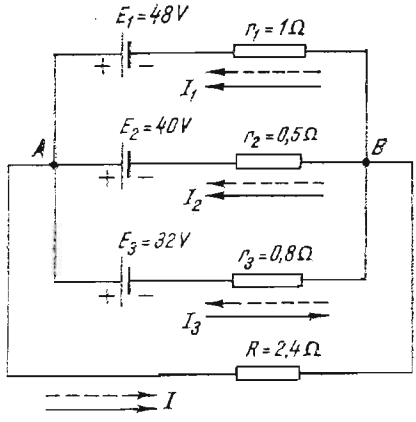


Fig. 2.15. Rezolvarea unei rețele electrice prin metoda tensiunilor între noduri (aplicația 2.10).

2. METODA TENSIUNILOR ÎNTRE NODURI

Această metodă este indicată în cazul rețelelor cu număr mic de noduri și multe elemente în paralel; în speță este foarte bună în cazul rețelelor avînd două noduri ca, de exemplu, cea din figura 2.15.

S-a presupus existența a trei surse de tensiuni electromotoare E_1, E_2, E_3 și rezistențe interioare r_1, r_2, r_3, sarcina exterioară fiind rezistența R. Determinarea curenților I_1, I_2, și I_3 se bazează pe determinarea prealabilă a tensiunii U între nodurile A și B.

Folosind relațiile:

$$U = E_1 - r_1 I_1 = E_2 - r_2 I_2 = \\ = E_3 - r_3 I_3 = RI \qquad (2.67)$$

se obțin patru ecuații distincte:

$$I_1 = \frac{E_1 - U}{r_1}; \quad I_2 = \frac{E_2 - U}{r_2}; \quad I_3 = \frac{E_3 - U}{r_3}; \quad I = \frac{U}{R} \qquad (2.68)$$

la care se mai adaugă relația:

$$I_1 + I_2 + I_3 = I. \qquad (2.69)$$

Înlocuind relațiile (2.68) în (2.69) se obține:

$$\frac{E_1 - U}{r_1} + \frac{E_2 - U}{r_2} + \frac{E_3 - U}{r_3} = \frac{U}{R}, \qquad (2.70)$$

relație care mai poate fi pusă sub forma

$$U\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \frac{1}{R}\right) = \frac{E_1}{r_1} + \frac{E_2}{r_2} + \frac{E_3}{r_3} \qquad (2.71)$$

și din care se obține după cîteva transformări simple * valoarea tensiunii U:

$$U = \frac{R(E_1 r_2 r_3 + E_2 r_1 r_3 + E_3 r_1 r_2)}{r_1 r_2 r_3 + r_1 r_3 R + r_1 r_2 R + r_2 r_3 R}. \qquad (2.72)$$

Înlocuind valoarea obținută a tensiunii U în relațiile (2.68) se determină în definitiv valorile curenților necunoscuți I_1, I_2, I_3 și I.

Aplicația 2.10. Să se rezolve rețeaua din figura 2.15 folosind metoda tensiunii între noduri.

Răspuns. Se va aplica direct relația (2.71) înlocuind valorile numerice din figura 2.15.

$$U\left(\frac{1}{1} + \frac{1}{0{,}5} + \frac{1}{0{,}8} + \frac{1}{2{,}4}\right) = \frac{48}{1} + \frac{40}{0{,}5} + \frac{32}{0{,}8}$$

$$U(1 + 2 + 1{,}25 + 0{,}4166) = 48 + 80 + 40$$

$$U \cdot 4{,}666 = 168 \Rightarrow U = \frac{168}{4{,}666} = 36 \text{ V}.$$

* Uneori, în cazul unui număr mai mare de ramuri în paralel este mai comod să se determine tensiunea U direct din relația (2.71).

Înlocuind $U = 36$ V în relațiile (2.68) se obține:

$$I_1 = \frac{48 - 36}{1} = 12 \text{ A}; \quad I_2 = \frac{40 - 36}{0,5} = 8 \text{ A};$$

$$I_3 = \frac{32 - 36}{0,8} = -5 \text{ A}; \quad I = \frac{36}{24} = 15 \text{ A}.$$

Observația 1. Curentul I_3 este negativ (-5 A), deci sursa de tensiune E_3 este un receptor de energie.

Observația 2. Rezultatele obținute verifică relația (2.69).

$$12 + 8 - 5 = 15 \text{ A}$$

deci putem fi siguri că se verifică și bilanțul energetic.

3. METODA SUPRAPUNERII EFECTELOR (SUPERPOZIȚIEI)

Metoda respectivă se aplică în rețelele în care există simultan mai multe tensiuni electromotoare $E_1, E_2 \ldots E_n$. Fie I_K curentul produs de aceste tensiuni electromotoare în latura K. Pentru determinarea acestui curent se consideră succesiv n rețele având numai una din tensiunile $E_1, E_2 \ldots E_n$, celelalte fiind nule:

1) E_1 și $E_2 = E_3 = \ldots E_n = 0$ se deduce I_{K_1};

2) E_2 și $E_1 = E_3 = \ldots E_n = 0$ se deduce I_{K_2};

3) E_3 și $E_1 = E_2 = \ldots E_n = 0$ se deduce I_{K_3};

.....

n) E_n și $E_1 = E_2 = \ldots E_{n-1} = 0$ se deduce I_{K_n}.

Curentul I_K din latura K în cazul existenței simultane a tensiunilor electromotoare $E_1, E_2 \ldots E_n$ se obține prin suprapunerea efectelor curenților parțiali:

$$I_K = I_{K_1} + I_{K_2} + \ldots + I_{K_n}.$$

Metoda se aplică în cazul unor rețele complexe, însă este foarte laborioasă.

4. METODA TRANSFIGURĂRII

Se folosește în cazul existenței unui număr mare de laturi pasive (conținînd numai rezistoare) unele dintre ele conectate în grupuri de cîte trei rezistoare care pot fi legate:

— după laturile unui triunghi R_1, R_2 și R_3 (conexiune triunghi), vîrfurile triunghiului fiind trei noduri A, B, C ale unei rețele (fig. 2.16, *a*);

— după o stea, R_A, R_B și R_C (conexiune stea), vîrfurile stelei fiind de asemenea trei noduri A, B, C ale unei rețele (fig. 2.16, *b*). Deoarece, în unele

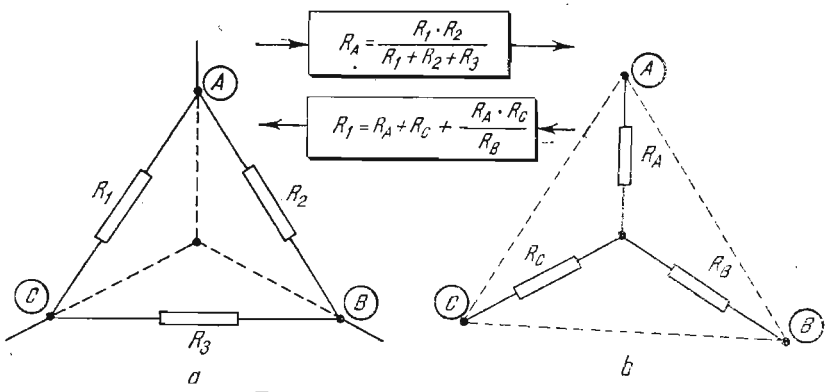


Fig. 2.16. Transfigurarea rețelei:
a — triunghi; *b* — stea.

cazuri, rezolvarea rețelei este mai simplă cînd cele trei rezistoare sînt legate în stea, iar în alte cazuri, cînd ele sînt legate în triunghi, se folosește o metodă de transfigurare a triunghiului într-o stea echivalentă respectiv transfigurarea stelei într-un triunghi echivalent.

Astfel, dacă se cunosc rezistențele R_1, R_2 și R_3 ale triunghiului, rezistențele R_A, R_B și R_C ale stelei echivalente sînt date de relațiile:

$$R_A = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_3}; \quad R_B = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3}; \quad R_C = \frac{R_3 \cdot R_1}{R_1 + R_2 + R_3}. \qquad (2.73)$$

Invers, dacă se cunosc rezistențele R_A, R_B și R_C se obțin:

$$R_1 = R_A + R_C + \frac{R_A \cdot R_C}{R_B}; \quad R_2 = R_A + R_B + \frac{R_A \cdot R_B}{R_C};$$

$$R_3 = R_B + R_C + \frac{R_B \cdot R_C}{R_A}. \qquad (2.74)$$

Aplicația 2.11. Să se rezolve rețeaua din figura 2.17 avînd parametrii din figură.

Răspuns. Rețeaua avînd cinci laturi și trei noduri ar fi necesar, de exemplu, pentru rezolvarea prin metoda teoremelor lui Kirchhoff, să se scrie cinci ecuații. Din figura 2.17, *a* se observă că rezistențele R_3, R_4 și R_5 constituie laturile unui triunghi (fig. 2.17, *b*), deci poate fi înlocuit cu o stea avînd rezistențele R_A, R_B și R_C.

$$R_A = \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4 + R_5} = \frac{2 \cdot 5}{2 + 3 + 5} = 1\ \Omega;$$

$$R_B = \frac{R_3 R_5}{R_3 + R_4 + R_5} = \frac{2 \cdot 3}{10} = 0{,}6\ \Omega;$$

$$R_C = \frac{R_4 R_5}{R_3 + R_4 + R_5} = \frac{5 \cdot 3}{10} = 1{,}5\ \Omega.$$

Rețeaua astfel obținută (fig. 2.17, *c*) se rezolvă mai simplu printr-o metodă cunoscută, de exemplu metoda teoremelor lui Kirchhoff, pe baza cărora se scrie:

$$I_1 + I_2 - I_A = 0;$$
$$E_1 = (R_1 + R_B) I_1 + R_A I_A;$$
$$E_2 = (R_2 + R_C) I_2 + R_A I_A$$

sau înlocuind valorile numerice rezultă:

$$I_1 + I_2 - I_A = 0;$$
$$28 = (6 + 0{,}6) I_1 + I_A;$$
$$115 = (10 + 1{,}5) I_2 + I_A.$$

Prin rezolvarea celor trei ecuații se obține:

$I_1 = 2{,}5$ A; $I_2 = 9$ A; $I_A = 11{,}5$ A.

Din figura 2.17, *c* se deudce:

$$U_{AB} = R_A I_A + R_B I_1 =$$
$$= 1 \cdot 11{,}5 + 0{,}6 \cdot 2{,}5 = 13 \text{ V};$$
$$U_{BC} = - R_B I_1 + R_C I_2 =$$
$$= - 0{,}6 \cdot 2{,}5 + 1{,}5 \cdot 9 = 12 \text{ V}.$$
$$U_{AC} = R_A I_A + R_C I_2 =$$
$$= 1 \cdot 11{,}5 + 1{,}5 \cdot 9 = 25 \text{ V}.$$

Revenind la rețeaua inițială (fig. 2.17, *d*) se trasează curenții reali în ramuri:

$$I_1 = 2{,}5 \text{ A}; \quad I_2 = 9 \text{ A};$$
$$I_3 = \frac{U_{AB}}{R_3} = \frac{13}{2} = 6{,}5 \text{ A};$$
$$I_4 = \frac{U_{AC}}{R_4} = \frac{25}{5} = 5 \text{ A};$$
$$I_5 = \frac{U_{BC}}{R_5} = \frac{12}{3} = 4 \text{ A}.$$

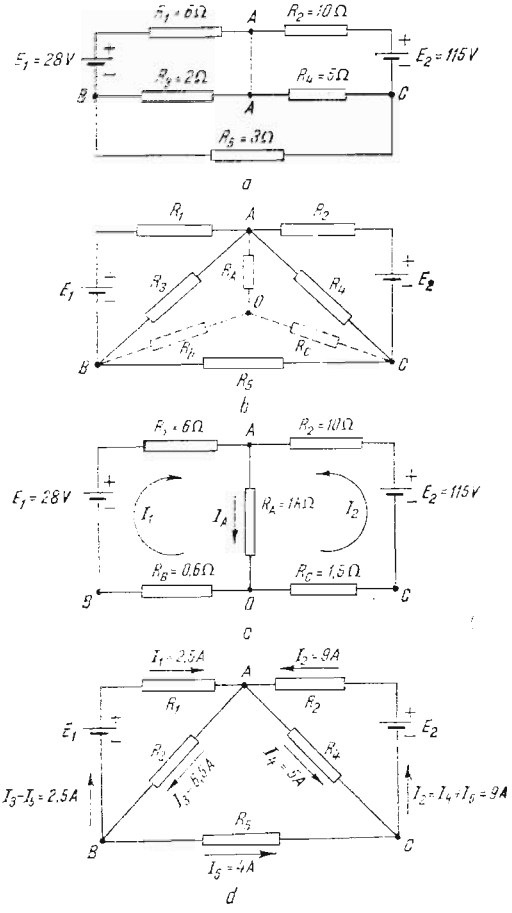


Fig. 2.17. Rezolvarea unei rețele electrice prin metoda transfigurării:
a — schema inițială; *b*, *c*, *d* — scheme echivalente.

În afara metodelor de rezolvare a rețelelor descrise mai sus care sînt cele mai uzuale și mai comode, mai există și alte metode, ca de pildă metoda generatorului echivalent etc. care prezintă în special valoare teoretică

REZUMAT

- Deplasarea în mod continuu a sarcinilor electrice prin conductoare formează curentul electric continuu.
- Trecerea curentului electric printr-un conductor poate fi pusă în evidență prin efectele sale: termic, luminos, chimic și magnetic.

● Legea lui Ohm stabilește că la un conductor de rezistență R parcurs de curentul I avînd la capete tensiunea U există următoarele relații între parametri:

$$U = RI; \quad I = \frac{U}{R}; \quad R = \frac{U}{I}.$$

● Legea Joule-Lenz arată că energia W a curentului electric este proporțională cu rezistența $R(\Omega)$, cu pătratul curentului $I(A)$ și cu timpul $t(s)$;

$$W = RI^2t \quad [J].$$

● Puterea electrică reprezintă energia produsă sau transformată în unitatea de timp

$$P = RI^2 = UI = \frac{U^2}{R} \text{ [W]}.$$

● Rețelele electrice de curent continuu sînt formate din surse și receptoare (rezistoare); structural, rețelele electrice sînt constituite din noduri (punctuale în care se întîlnesc cel puțin trei conductoare) și laturi (ansamblu de surse și rezistoare legate în serie între două noduri).

● Teoremele lui Kirchhoff aplicate rețelelor electrice de curent continuu stabilesc:

— *Teorema I.* Suma algebrică a curenților dintr-un nod este nulă ($\Sigma I = 0$).

— *Teorema II.* Într-un circuit electric închis suma algebrică a tensiunilor electromotoare este egală cu suma algebrică a căderilor de tensiune.

● Sursele electrice ca și rezistoarele pot fi legate în conexiunile: serie, paralel și mixtă.

● Calculul rețelelor de curent continuu constă în determinarea curenților în laturi cînd se cunosc celelalte elemente ale rețelei.

VERIFICAREA CUNOȘTINȚELOR

1. Curentul electric prin interiorul unei surse poate circula:

   a — de la plus spre minus?
   b — de la minus spre plus?
   c — în ambele sensuri?

2. Legea lui Ohm stabilește că intensitatea curentului electric prin conductoare din materiale diferite însă de aceeași rezistență este diferită în funcție de:

   a — valoarea rezistivității materialului?
   b — valoarea tensiunii aplicate?
   c — secțiunea conductorului?

3. Cantitățile de căldură produse la trecerea aceluiași curent prin conductoare din materiale diferite de aceleași lungimi și secțiuni sînt diferite de la un material la altul fiind:

   a — direct proporționale cu conductivitatea electrică?
   b — invers proporționale cu conductivitatea electrică?
   c — invers proporționale cu rezistivitatea?

4. Puterea absorbită de un rezistor la bornele căruia se menține tensiunea constantă va crește atunci cînd:

   a — rezistența sa va scădea?
   b — rezistența sa va crește?
   c — conductivitatea sa va scădea?

5. Tensiunea la bornele unui acumulator:

   a — crește cu creșterea rezistenței interne?
   b — scade cu creșterea rezistenței interne?
   c — este independentă de rezistența internă?

6. Cea mai simplă rețea electrică are:

   a — zero noduri?
   b — un nod?
   c — două noduri.

7. În scrierea primei teoreme a lui Kirchhoff pentru rezolvarea unei rețele electrice se consideră:

   a — sensurile reale ale curenților în noduri?
   b — sensuri arbitrare ale curenților în noduri?
   c — că toți curenții dintr-un nod au sensuri pozitive?

8. În scrierea celei de a doua teoreme a lui Kirchhoff pentru rezolvarea unei rețele electrice se consideră:

   a — același sens trigonometric de parcurgere pentru toate circuitele închise?
   b — că sensul de parcurgere al unui circuit închis este cel corespunzător sursei de tensiune cea mai mare?
   c — sensuri arbitrare de parcurgere a circuitelor închise?

CAPITOLUL 3

ELECTROMAGNETISM

A. FENOMENE MAGNETICE ŞI ELECTROMAGNETICE

1. FENOMENE MAGNETICE

Sînt cunoscute proprietăţile unor bucăţi de metal (magneţi permanenţi) realizate pe cale naturală sau artificială de a atrage obiecte de oţel sau de a orienta în diverse moduri acul unei busole. Se spune că aceşti magneţi permanenţi posedă un cîmp magnetic * care acţionează prin forţe de-a lungul unor linii de forţă ce pornesc de la un capăt al magnetului (polul nord — N —) şi se închid la celălalt capăt al său (polul sud — S —) (fig. 3.1).

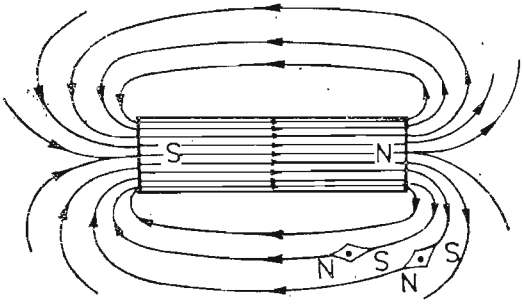


Fig. 3.1. Cîmpul magnetic al unui magnet permanent.

Traseul acestor linii de forţă poate fi pus în evidenţă de exemplu prin plimbarea unui ac magnetic — busolă — în jurul magnetului, acesta plasîndu-se întotdeauna în lungul liniilor de forţă magnetice, polul nord al acului indicînd sensul cîmpului.

Observaţie. Polul N al acului este orientat spre polul S al magnetului şi invers.

2. FENOMENE ELECTROMAGNETICE

Experimental s-a constatat că şi curenţii electrici creează în jurul lor cîmpuri magnetice a căror prezenţă este pusă în evidenţă, de exemplu, cu ajutorul acului magnetic care indică traseul şi sensul liniilor de forţă.

Astfel, liniile de forţă ale cîmpului magnetic produse de un curent I într-un conductor rectiliniu (fig. 3.2, *a*) sînt circulare şi concentrice faţă de conductor. În ceea ce priveşte sensul liniilor de forţă ale cîmpului magnetic,

* De fapt este vorba despre un cîmp de forţe magnetice.

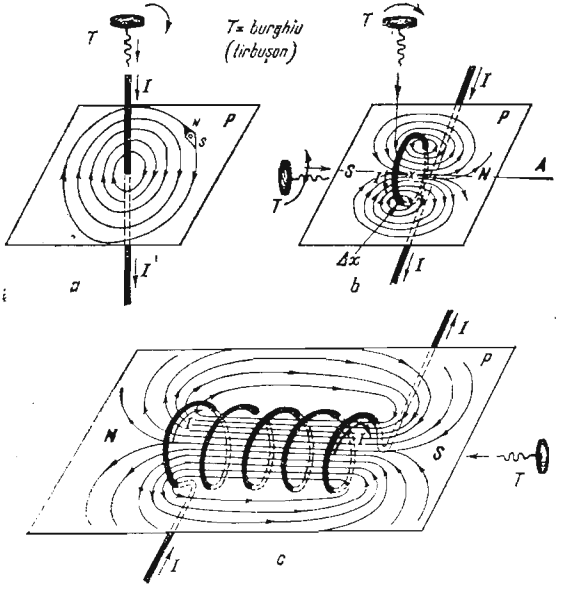


Fig. 3.2. Cîmpul electromagnetic produs de:
a — un conductor linear; *b* — o spiră; *c* — un solenoid.

acesta se determină cu regula burghiului * care arată că: liniile magnetice de forță au sensul de rotire al unui burghiu care înaintează în sensul de deplasare al curentului (fig. 3.2, *a*). În cazul unei spire conductoare parcursă de un curent I liniile de forță ale cîmpului magnetic au aspectul din figura 3.2, *b*.

Sensul liniilor de forță ale cîmpului magnetic se determină cu aceeași regulă a burghiului care în acest caz este mai comod să fie aplicată sub următoarea formă: liniile de forță magnetice se deplasează în sensul de înaintare al burghiului atunci cînd curentul circulă în sensul de rotire al burghiului (fig. 3.2, *b*).

Observația 1. În ambele formulări legea burghiului este aceeași. În adevăr dacă se consideră un element Δx din conductor (fig. 3.2, *b*) în punctul în care acesta înțeapă planul imaginar P se poate observa că legea burghiului poate fi aplicată și în prima formulare.

Observația 2. Liniile de forță au fost trasate numai în planul imaginar P perpendicular pe planul spirei (fig. 3.2, *b*). În realitate ele există în mod uniform în întreg spațiul din jurul spirei, aspectul lor — spectrul magnetic — fiind același în oricare alt plan perpendicular pe planul spirei (planul P rotit în jurul axei A de simetrie a spirei).

În sfîrșit, dacă se consideră o bobină (solenoid) parcursă de un curent I spectrul magnetic al liniilor de forță va fi acela din figura 3.2, *c*, lucru care

* sau a șurubului normal, cu filet, pe dreapta.

ne apare logic ținînd seama de faptul că o bobină nu reprezintă altceva decît un număr de spire înseriate la care se aplică aceleași reguli ca mai înainte.

Se constată că spectrul magnetic al unui solenoid (fig. 3.2, *c*) este practic identic cu al unui magnet permanent care ar ocupa spațiul din interiorul bobinei. Prin identificarea fenomenelor se poate vorbi în acest caz și de un pol nord (N) respectiv de un pol sud (S) al bobinei.

Din cele arătate mai sus rezultă că, în afara cîmpului electric care se manifestă în conductoare (sensul lui fiind același cu cel al curentului electric) întotdeauna este prezent și un cîmp magnetic (ale cărui linii de forță sînt perpendiculare pe cele ale cîmpului electric) dependent de cel electric și cu care constituie în ansamblu *cîmpul electromagnetic*.

B. INDUCȚIA MAGNETICĂ ȘI INTENSITATEA CÎMPULUI MAGNETIC

1. INDUCȚIA MAGNETICĂ

Cîmpul magnetic se poate caracteriza în fiecare punct al său printr-o mărime vectorială B numită inducție magnetică. Această mărime depinde de valoarea curentului care a produs cîmpul magnetic și în sistemul de unități SI se măsoară într-o unitate numită tesla * (T). De exemplu, pentru un solenoid care se închide sub formă de inel — tor — (fig. 3.3) și care este parcurs de curentul I, valoarea inducției magnetice B în interiorul bobinei inelare este:

$$B = \mu_0 \frac{n}{l} I \ [\mathrm{T}] \tag{3.1}$$

în care: n este numărul de spire ale solenoidului;
l — lungimea medie a torului ($l = 2\pi r$ — r fiind raza torului);
μ_0 — permeabilitatea magnetică a vidului, practic egală cu a aerului, în care se găsesc liniile de forță.

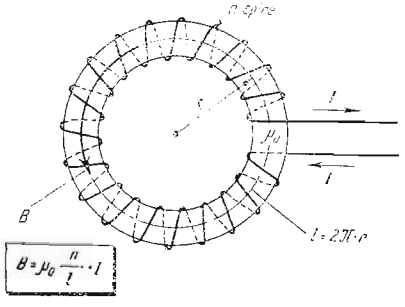


Fig. 3.3. Inducția magnetică într-un tor.

De fapt, într-un caz general factorul μ (citește „miu") reprezintă o mărime specifică fiecărui mediu material străbătut de liniile de forță ale cîmpului magnetic (asemănătoare permitivității dielectrice ε a materialelor izolante în cîmp electric — v. cap. I).

Permeabilitatea magnetică a vidului are o valoare constantă:

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \left[\frac{\mathrm{T \cdot m}}{\mathrm{A}}\right].$$

* După numele fizicianului Nicola Tesla.

Dacă în interiorul aceleiași bobine — torului — se află alt material, de exemplu oțel (un inel de oțel se numește și miez feromagnetic), valoarea inducției se modifică deși curentul I a rămas același:

$$B = \mu \frac{n}{l} I, \tag{3.2}$$

ceea ce dovedește că permeabilitatea magnetică μ este diferită pentru diferite materiale.

Raportul dintre permeabilitatea magnetică μ a unui mediu material oarecare și permeabilitatea magnetică μ_0 a vidului se numește *permeabilitate magnetică relativă* μ_r, adică:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}. \tag{3.3}$$

2. INTENSITATEA CÎMPULUI MAGNETIC

Dacă pentru un mediu magnetic omogen dintr-un cîmp magnetic se raportează valoarea inducției magnetice la valoarea permeabilității magnetice se obține o mărime vectorială H, în fază * cu B, numită intensitatea cîmpului magnetic.

În cazul bobinei toroidale se obține

$$H = \frac{B}{\mu} = \frac{n}{l} I \left[\frac{\text{A}}{\text{m}}\right]. \tag{3.4}$$

Observația 1. Spre deosebire de inducția magnetică B intensitatea cîmpului magnetic H nu depinde de natura mediului material.

Observația 2. Unitatea de măsură pentru intensitatea cîmpului magnetic este [A/m] sau — din relația (3.4) — observînd că n este numărul total de spire al bobinei (n este un număr fără dimensiuni) se poate spune că H poate fi exprimat în amperspire pe metru (de lungime).

Din relația (3.4) se deduce:

$$B = \mu H \tag{3.5}$$

relație care este valabilă pentru orice circuit magnetic. Prin circuit magnetic se înțelege orice circuit închis străbătut de liniile de forță magnetice.

C. FORȚE ELECTROMAGNETICE ȘI ELECTRODINAMICE. FLUX MAGNETIC

1. FORȚE ELECTROMAGNETICE

Dacă într-un cîmp magnetic ** se introduce un conductor parcurs de curent, acesta va fi supus unei forțe mecanice numită *forță electromagnetică*. Direcția de acționare a acestei forțe este perpendiculară pe planul constituit din vectorul inducție magnetică B și de direcția curentului I.

---

* în același sens.

** produs de un magnet permanent sau de un curent electric (electromagnet).

Dacă direcția curentului din conductorul de lungime l este perpendiculară pe direcția liniilor de forță magnetice, forța electromagnetică F este dată de relația (fig. 3.4, *a*):

$$F = BIl \text{ [N]}. \tag{3.6}$$

În figura 3.4, *a* se prezintă și sensul forței F. Se presupune că vectorul inducție magnetică B este orizontal și orientat de la dreapta la stînga, iar curentul I este oblic pe planul hîrtiei avînd sensul spre spatele hîrtiei (crucea ⊗).

Atenție! Indicația ⊗ arată că un vector venind de deasupra hîrtiei înțeapă planul acesteia — simbolul cozii unei săgeți care intră în hîrtie. Indicația ⊙ arată că un vector venind de sub hîrtie înțeapă planul acesteia — simbolul vîrfului unei săgeți care iese din hîrtie.

Pentru determinarea sensului forței electromagnetice se pot folosi următoarele metode:

● **Regula mîinii stîngi**: Mîna stîngă avînd degetul mare depărtat la 90° și în același plan cu celelalte degete (fig. 3.4, *b*), se așază astfel ca vectorul B să înțepe palma, iar curentul I să circule în sensul degetului arătător. În acest caz degetul mare indică sensul forței F.

● **Regula îndesirii liniilor de forță**: Reluînd schematic figura 3.4, *a* se trasează conform legii burghiului liniile de forță ale cîmpului magnetic de inducție B' produs de curentul I (fig. 3.4, *c*). Ca efect (fig. 3.4, *d*) în partea superioară a conductorului inducția B' are același sens cu B, deci liniile de forță se îndesesc, iar în partea inferioară inducția B' are sens contrar inducției B, deci inducția totală scade. Se observă că sensul forței F este astfel

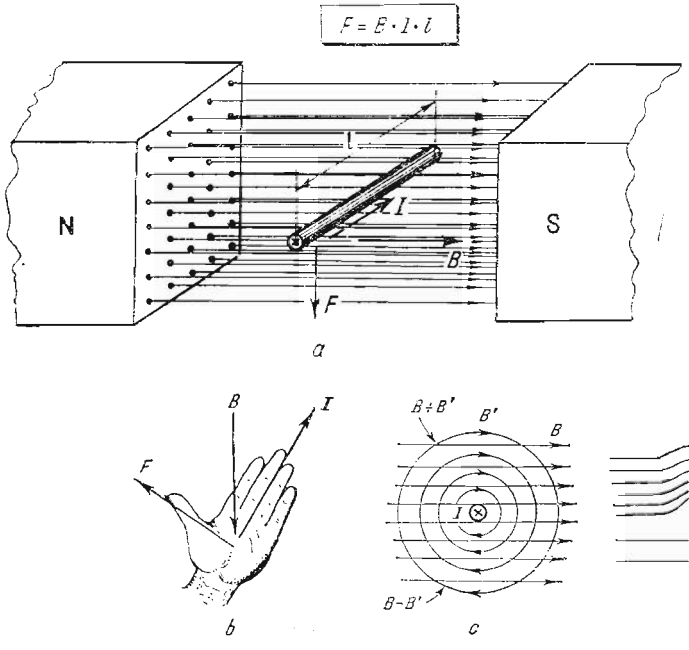


Fig. 3.4. Forțe electromagnetice:
a — conductor parcurs de curent în cîmp magnetic; *b* — regula mîinii stîngi; *c* — însumarea inducțiilor la un conductor în cîmp magnetic; *d* — sensul forței electromagnetice.

orientat ca și cum liniile de forță ale cîmpului rezultat ar fi elastice împingînd conductorul de sus în jos, deci sensul forței F este dinspre cîmpul de inducție mai mare $(B + B')$ spre cel de inducție mai mică $(B - B')$.

2. FORȚE ELECTROMAGNETICE

Dacă se consideră două conductoare C_1 și C_2 (fig. 3.5, *a*) plasate în aer și parcurse de curenții I_1 și I_2, ele vor fi supuse unei forțe F de atragere sau de respingere care se calculează cu relația:

$$F = \frac{\mu_0 l}{2\pi d} I_1 I_2, \tag{3.7}$$

în care: l este lungimea de paralelism între conductoare;
d — distanța între conductoare.

Aceste tipuri de forțe se numesc *forțe electrodinamice* și ele au sensul de respingere dintre conductoare dacă curenții au sensuri contrare (fig. 3.5, *a*) și au sensul de atragere dacă cei doi curenți au același sens (fig. 3.5, *b*). Pentru a demonstra acest lucru se va considera situația din figura 3.5, *a* însă conductoarele văzute de sus (fig. 3.5, *c*). În acest caz, se observă că liniile de forță ale cîmpurilor magnetice au sensurile din figură, deci în axa conductoarelor se vor afla vectorii B_1 produs de curentul I_1 (conform regulii burghiului)

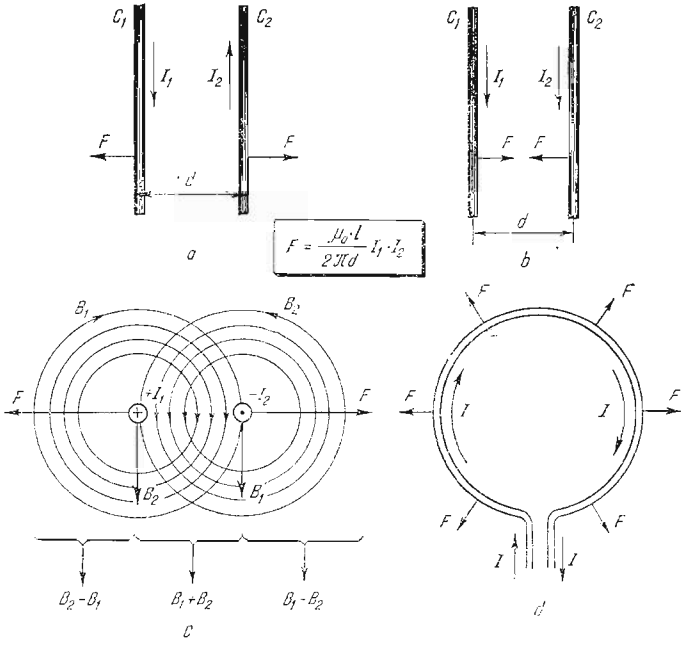


Fig. 3.5. Forțe electrodinamice:
a — de respingere; *b* — de atracție; *c* — determinarea sensului de respingere; *d* — forțe în bucle parcurse de curent.

și B_2 produs de I_2. Se constată că forțele electrodinamice F sînt de respingere în conformitate cu:

— regula mîinii stîngi;

— faptul că liniile cîmpului magnetic se îndesesc între conductoare.

În cazul unei bucle închise — spire — (fig. 3.5, *d*) parcurse de același curent, I, curentul avînd în ramurile elementare paralele sensuri opuse rezultă un efect de respingere, între elementele aceleiași bucle. Ca urmare, se spune despre o buclă parcursă de un curent electric că ea tinde să se mărească (extindă) la maximum.

Observație. Forțele electrodinamice nu sînt altceva decît forțe electromagnetice la care se cunoaște curentul, de exemplu I_1 care a produs cîmpul de inducție B_1 în care este situat conductorul parcurs de un alt curent, de exemplu I_2.

În adevăr, relația (3.7) se poate scrie astfel:

$$F = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d} l I_2 = B_1 l I_2. \tag{3.8}$$

Prin identificarea relației (3.8) cu (3.6) se poate obține valoarea inducției B_1 a unui cîmp produs de un conductor liniar parcurs de un curent I_1 la distanța d de conductor:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d}. \tag{3.9}$$

3. FLUX MAGNETIC

Considerînd o suprafață S (contur închis) perpendiculară pe direcția liniilor de forță a unui cîmp magnetic de inducție B (fig. 3.6, *a*) se definește *fluxul de inducție magnetică* Φ (pe scurt fluxul magnetic Φ) produsul:

$$\Phi = BS. \tag{3.10}$$

Unitatea de măsură a fluxului magnetic este weber-ul (Wb). [1 Wb = = 1 T × m^2). Din această cauză unitatea de măsură a inducției magnetice (tesla) mai este definită uneori ca fiind Weber-ul pe metru pătrat [1 T=Wb/m^2].

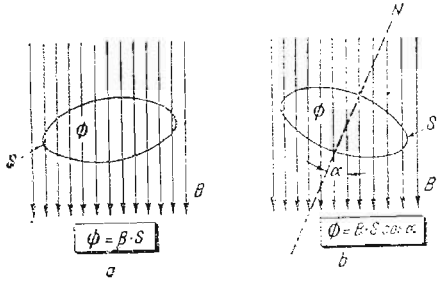


Fig. 3.6. Flux magnetic:
a — prin suprafețe perpendiculare pe cîmp; *b* — prin suprafețe oblice.

În cazul în care liniile magnetice ale unui cîmp de inducție magnetică B fac un unghi α cu normala N la planul conturului (fig. 3.6, *b*) de suprafață S valoarea fluxului magnetic respectiv este dată de relația:

$$\Phi = BS \cos \alpha. \tag{3.11}$$

În sfîrșit, dacă se consideră numai o spiră de secțiune S avînd în interior un cîmp magnetic de inducție B (produs de curentul I ce o străbate) fluxul magnetic al unei spire va fi:

$$\Phi = BS \tag{3.12}$$

iar dacă se consideră similar o bobină cilindrică sau toroidală avînd n spire, atunci fluxul total ce străbare bobina va fi:

$$\psi = nBS = n\Phi. \tag{3.13}$$

D. CIRCUITE MAGNETICE

1. MATERIALE MAGNETICE

Diversele materiale se comportă în mod diferit în cîmpuri magnetice în sensul că ele prezintă (la aceleași dimensiuni geometrice) permeabilități magnetice diferite *.

Se consideră un circuit magnetic oarecare sub influența unui cîmp magnetic H, de exemplu un solenoid toroidal de lungime medie $l (l = 2\pi r$; $r =$ = raza torului) avînd un număr n de spire parcurse de curentul I (fig. 3.7, *a*) — $H = \frac{nI}{l}$.

După cum s-a arătat, dacă circuitul magnetic este plasat în vid („mediul magnetic" al torului este vidul), în acest caz inducția magnetică B_0 a cîmpului va fi:

$$B_0 = \mu_0 H.$$

● **Materiale paramagnetice.** În cazul în care mediul este format din anumite materiale, de exemplu aer sau unele metale (fig. 3.7, *b*) inducția magnetică crește cu o inducție suplimentară B', față de inducția în vid, deși cîmpul H a rămas neschimbat:

$$B_1 = B_0 + B' = \mu_0 H + B'.$$

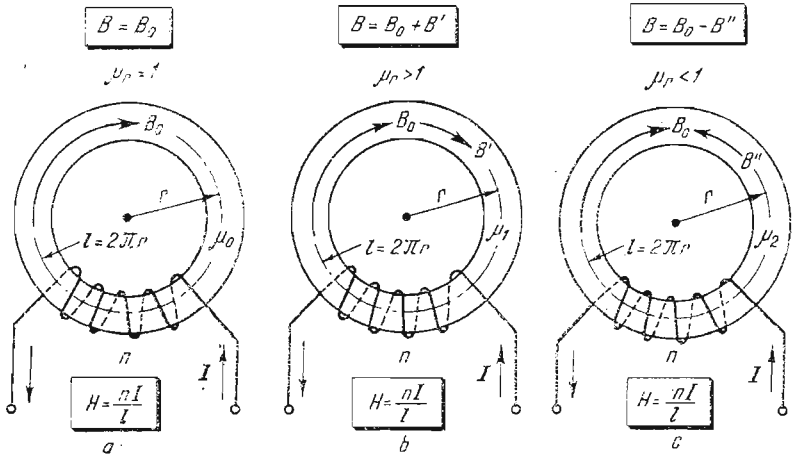


Fig. 3.7. Materiale magnetice:
a — vid; *b* — paramagnetice; *c* — diamagnetice.

* După cum în cîmp electric materialele diferite prezintă rezistențe diferite (la aceleași dimensiuni geometrice), deci conductivități electrice diferite.

Ca urmare permeabilitatea magnetică absolută μ_1 va avea valoarea:

$$\mu_1 = \frac{B_1}{H} = \mu_0 + \frac{B'}{H} > \mu_0. \tag{3.14}$$

Din relația (3.14) se deduce permeabilitatea magnetică relativă μ_{r1}:

$$\mu_{r1} = \frac{\mu_1}{\mu_0} = 1 + \frac{B'}{\mu_0 H} = 1 + \frac{B'}{B_0} > 1. \tag{3.15}$$

Materialele la care permeabilitatea magnetică relativă este supraunitară se numesc materiale *paramagnetice*. De exemplu aerul are $\mu = 1{,}000003$, deci permeabilitatea aerului se consideră practic egală cu cea a vidului.

● **Materiale diamagnetice.** La alte tipuri de materiale ca, de exemplu, cuprul inducția magnetică scade ușor cu o inducție suplimentară B'' față de inducția în vid, deși cîmpul H a rămas neschimbat (fig. 3.7, *c*):

$$B_2 = B_0 - B'' = \mu_0 H - B''. \tag{3.16}$$

Permeabilitatea magnetică absolută a acestor tipuri de materiale va avea valoarea

$$\mu_2 = \frac{B_2}{H} = \mu_0 - \frac{B'}{H} < \mu_0. \tag{3.17}$$

Similar, se deduce:

$$\mu_{r2} = \frac{\mu_2}{\mu_0} = 1 - \frac{B''}{\mu_0 H} = 1 - \frac{B''}{B_0} < 1. \tag{3.18}$$

Materialele la care permeabilitatea magnetică relativă este subunitară se numesc materiale *diamagnetice*. De exemplu, cuprul are $\mu_r = 0{,}999995$.

● **Materiale feromagnetice.** O grupă specială de materiale paramagnetice o constituie cele feromagnetice, la care permeabilitatea magnetică relativă nu numai că este supraunitară dar are valori foarte mari (fig. 3.7, *b*). De exemplu $\mu_r = 500 \ldots 5\,000$.

Din această categorie de materiale fac parte în principal compușii fierului — fonta, oțelul — și nichelul precum și unele aliaje ale acestora.

Observație. În calculele tehnice pentru toate materialele, cu excepția celor feromagnetice, se consideră $\mu_r = 1$.

2. MAGNETIZAREA MATERIALELOR FEROMAGNETICE

Permeabilitatea magnetică a materialelor feromagnetice nu este constantă, ci variază în funcție de cîmpul magnetic. Considerînd torul din exemplul precedent realizat din material feromagnetic, de exemplu oțel avînd bobina alimentată cu un curent avînd succesiv valorile I_1, I_2, I_3 ... ($I_1 < I_2 < I_3$) se obține curba $B = f(H)$ din figura 3.8, care poate fi considerată ca avînd trei zone:

— *Zona O — X* este o porțiune liniară cu pantă relativ mare*, zona în care inducția B este proporțională cu cîmpul H, deci μ este constant și relativ mare; este zona în care se spune că miezul magnetic funcționează nesaturat;

* Panta curbei reprezintă chiar permeabilitatea magnetică μ.

— *Zona* $X - Y$ este porțiunea în care fierul începe să se satureze, deci permeabilitatea magnetică scade; zona este numită cotul curbei de magnetizare;

— *Zona* $Y - Z$ este o porțiune liniară cu panta relativ mică, iar μ are o valoare aproximativ constantă care tinde spre μ_0 (deci $\mu_r \approx 1$); aceasta este zona saturată a curbei de magnetizare.

Pe aceeași diagramă s-a trasat și curba $\mu_r = f(H)$ dedusă din curba $B = f(H)$.

În figura 3.9 se prezintă curba $B = f(H)$ pentru un anumit tip de oțel electrotehnic folosit la construcția mașinilor și aparatelor electrice.

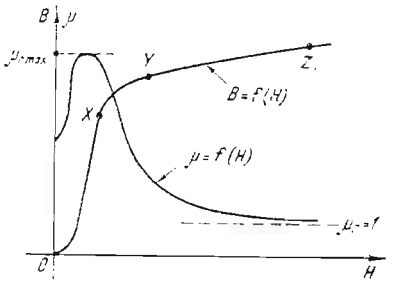


Fig. 3.8. Caracteristicile $B = f(H)$ și $\mu = f(H)$.

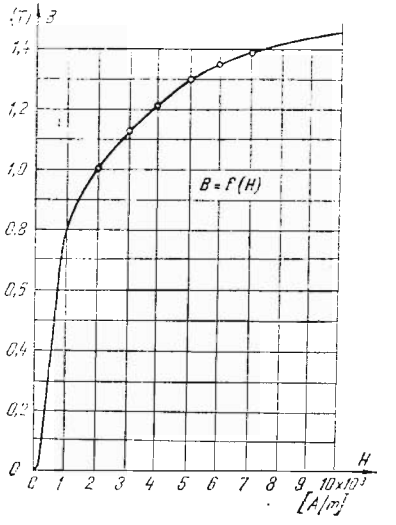


Fig. 3.9. Curba de magnetizare a oțelului electrotehnic.

Observație, În apropierea originii (fig. 3.8) curba de magnetizare prezintă un cot relativ mic, ceea ce face ca μ_r să nu aibă valoarea maximă $\mu_{r\,max}$ începînd chiar de la valori foarte mici ale cîmpului H.

Dacă magnetizarea miezului de oțel se face prin variația continuă a curentului I de la $0 \rightarrow I_{max} \rightarrow 0 \rightarrow -I_{max} \rightarrow 0$ cîmpul magnetic H va prezenta o variație similară $0 \rightarrow H_{max} \rightarrow 0 \rightarrow -H_{max} \rightarrow 0$ însă inducția B va avea valori diferite după cum cîmpul H este în creștere sau în scădere (fig. 3.10).

S-a obținut astfel o curbă de magnetizare închisă numită *ciclu de histerezis*. Denumirea de „histerezis" vine din limba greacă și înseamnează „rămînere în urmă". În adevăr, din figura 3.10 se observă de exemplu că în punctul *2* deși curentul I (cîmpul H) a revenit la zero totuși inducția mai are o valoare pozitivă $B = B_r$ numită inducție remanentă; de asemenea în punctul *5* deși $H = 0$ totuși $B = -B_r$. Similar, în punctul *3* (respectiv *6*) pentru a putea produce o inducție magnetică nulă venind dinspre inducții remanente pozitive (respectiv negative) este necesar un cîmp $-H_c$ (punctul *3*) respectiv $+H_c$ (punctul *6*) numit *cîmp coercitiv*. În timpul unui ciclu de histerezis materialul absoarbe din cîmpul magnetic o cantitate de enrgie * care se transformă în căldură și care constituie *pierderile prin histerezis*. Acest lucru apare cu pregnanță în curentul alternativ unde curentul își schimbă sensul de 50 de ori pe secundă (v. cap. 4).

* Energia este necesară învingerii frecărilor produse în timpul orientării unor curenți moleculari din interiorul materialului.

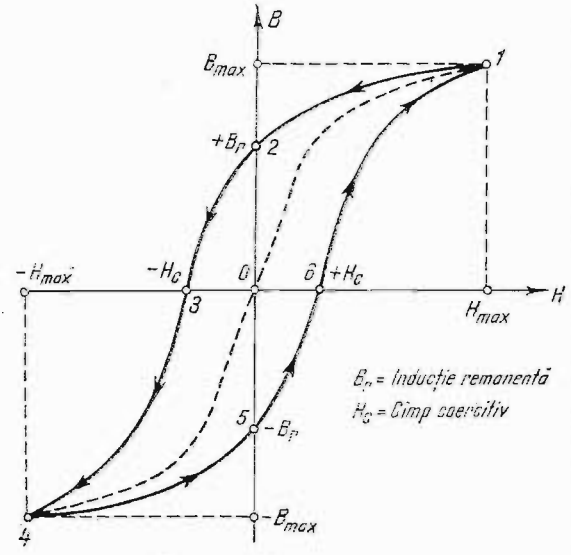


Fig. 3.10. Ciclu histerezis.

Pierderile prin histerezis sînt proporționale cu suprafața ciclului de histerezis și, bineînțeles, cu cantitatea de material feromagnetic.

Din această cauză în industrie pentru un anumit tip de oțel electrotehnic și pentru o anumită frecvență (de exemplu $f = 50$ Hz) se menționează pierderile specifice [W/kg] prin fenomenul de histerezis.

Prin realizarea unor table (tole) dintr-un oțel special numit oțel electrotehnic obținut prin adaos de siliciu (4—5% Si) în fier se asigură o curbă de magnetizare cu permeabilitate magnetică mare precum și un ciclu de histerezis cu o suprafață relativ redusă.

Prin folosirea unor oțeluri speciale cu inducții remanente mari și cîmpuri coercitive mari se realizează magneți permanenți, care deci își păstrează proprietățile magnetice și în lipsa cîmpului de inducție H produs de curenții electrici.

3. LEGEA CIRCUITULUI MAGNETIC

Se consideră un tor de oțel (fig. 3.11) de lungime medie l($l = 2\pi r$; r fiind raza medie a torului) avînd o bobină constituită din n spire și străbătută de curentul I.

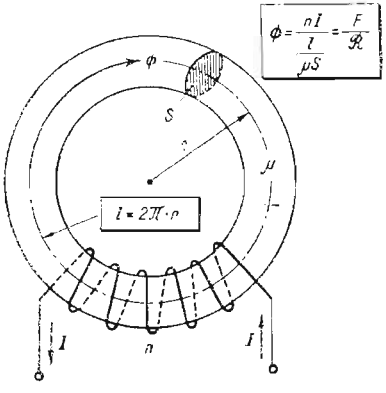


Fig. 3.11. Legea circuitului magnetic la un tor omogen.

Ținînd seama de relațiile (3.2) și (3.10) se poate scrie expresia fluxului magnetic Φ ce străbate torul:

$$\Phi = \mu \frac{nI}{l} \cdot S = \frac{nI}{\frac{l}{\mu S}}. \qquad (3.19)$$

Expresia:

$$\mathcal{F} = nI \qquad (3.20)$$

se numește *tensiune magnetomotoare* sau *solenație* și poate fi exprimată în amperspire.

Expresia:

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu S} \qquad (3.21)$$

se numește *reluctanța* circuitului magnetic.

Ca urmare ținînd seama de expresiile (3.20) și (3.21) fluxul magnetic (relația 3.19) poate fi exprimat într-o formă mai simplă astfel:

$$\Phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}}, \tag{3.22}$$

relație care definește legea circuitului magnetic.

Se poate constata o analogie între relația (3.22) și relația care definește legea lui Ohm:

$$I = \frac{E}{R}. \tag{3.23}$$

În adevăr relația (3.22) poate fi considerată ca analoaga legii lui Ohm aplicată unui circuit magnetic putînd face o analogie și între mărimile componente:

I = curent electric → Φ = flux (curent) magnetic;

E = tensiune electromotoare → $\mathcal{F}$ = tensiune magnetomotoare;

R = rezistența electrică $\left[R = \frac{l}{\gamma \cdot S}\right]$ → $\mathcal{R}$ = reluctanța magnetică $\left[\mathcal{R} = \frac{l}{\mu S}\right]$;

γ = conductivitatea electrică → μ = permeabilitatea magnetică.

După cum se va vedea, analogia între mărimile electrice și magnetice poate fi extinsă cu observația că în timp ce conductivitatea γ este în principiu constantă, permeabilitatea magnetică μ se modifică cu tensiunea magnetomotoare, ceea ce ne determină să spunem că circuitele magnetice sînt nelineare.

Din relația (3.4) și (3.20) se poate observa că intensitatea cîmpului magnetic H nu reprezintă altceva decît tensiunea magnetomotoare pe unitatea de lungime a circuitului magnetic,

$$H = \frac{\mathcal{F}}{l} = \frac{nI}{l}. \tag{3.24}$$

Să presupunem că torul de oțel este întrerupt (tăiat) pe o lungime l_a (fig. 3.12) astfel că lungimea circuitului în fier rămîne $l_f (l_a + l_f = l = 2\pi r)$. Porțiunea de aer din circuitul magnetic se numește intrefier.

În acest caz reluctanța circuitului magnetic („rezistența" magnetică) se modifică întrucît fluxul magnetic trebuie să străbată și o porțiune de aer care are permeabilitatea magnetică mult mai mică. Legea circuitului magnetic se scrie în această situație:

$$\Phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}_f + \mathcal{R}_a} = \frac{nI}{\frac{l_f}{\mu S} + \frac{l_a}{\mu_0 S}}. \tag{3.25}$$

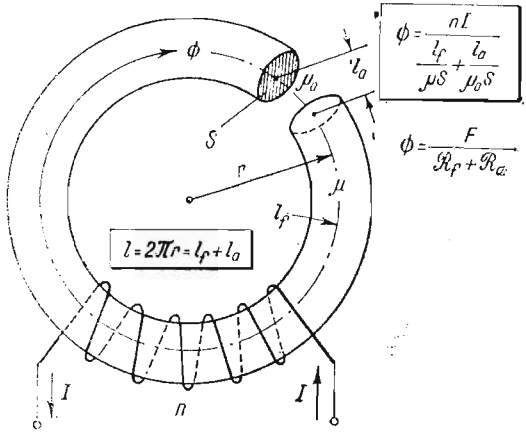


Fig. 3.12. Legea circuitului magnetic la un tor cu întrefier.

Trecînd la o formulare generală, dacă se presupune că de-a lungul unui circuit magnetic oarecare există diverse porțiuni cu

lungimile l_1, $l_2 \ldots l_n$, secțiunile S_1, $S_2 \ldots S_n$ și permeabilitățile magnetice μ_1, $\mu_2 \ldots \mu_n$ legea circuitului magnetic se poate scrie:

$$\Phi = \frac{nI}{\frac{l_1}{\mu_1 S_1} + \frac{l_2}{\mu_2 S_2} + \ldots + \frac{l_n}{\mu_n S_n}}. \tag{3.26}$$

Observație. Reluctanțele magnetice se înseriază (însumează aritmetic) întocmai ca rezistențele ohmice legate în serie.

4. LEGEA CURENTULUI TOTAL

Relația (3.26) mai poate fi scrisă sub forma:

$$nI = \frac{\Phi \cdot l_1}{\mu_1 \cdot S_1} + \frac{\Phi l_2}{\mu_2 \cdot S_2} + \ldots + \frac{\Phi \cdot l_n}{\mu_n \cdot S_n}. \tag{3.27}$$

Dar conform cu (3.10) raportul între fluxul Φ și secțiunea S_K reprezintă inducția B_K în acea porțiune

$$B_K = \frac{\Phi}{S_K}. \tag{3.28}$$

De asemenea, conform cu (3.5) raportul între inducția B_K și permeabilitatea μ_K reprezintă cîmpul magnetic în acea porțiune:

$$H_K = \frac{B_K}{\mu_K} = \frac{\Phi}{\mu_K S_K}. \tag{3.29}$$

Înlocuind relația (3.29) în (3.27) rezultă:

$$nI = H_1 l_1 + H_2 l_2 + \ldots + H_n l_n, \tag{3.30}$$

relație care definește *legea curentului total.*

În sfîrșit dacă pe un miez magnetic există mai multe bobine A_1, $A_2 \ldots A_n$ avînd n_1, $n_2 \ldots n_m$ spire fiecare și străbătute de curenți I_1, $I_2 \ldots I_m$, tensiunea magnetomotoare totală $\mathfrak{F}$ va fi dată de suma solenațiilor parțiale luate cu semnul lor,

$$\mathfrak{F} = n_1 I_1 \pm n_2 I_2 \pm \ldots \pm n_m I_m. \tag{3.31}$$

Luînd una dintre solenații ca referință — de exemplu $n_1 I_1$ — se va adopta semnul plus (+) sau minus (—) dacă, conform legii burghiului, cîmpul produs de solenația considerată are același sens, respectiv sens contrar față de solenația de referință.

Aplicația 3.1 Să se calculeze fluxul magnetic Φ prin miezul magnetic din figura 3.13 parametrii fiind cei indicați în figură și presupunînd că miezul de fier este nesaturat; se va admite permeabilitatea magnetică relativă a fierului $\mu_r = 650$.

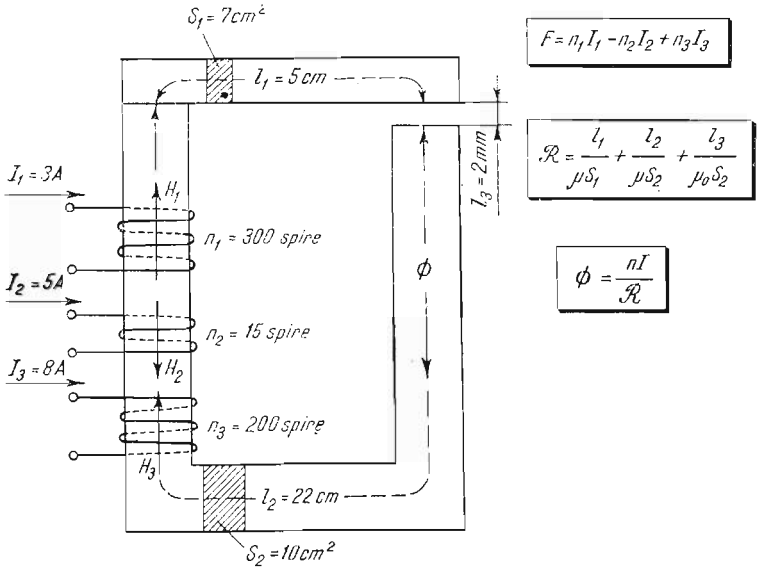


Fig. 3.13. Calculul circuitului magnetic (aplicația 3.1).

Răspuns.

Permeabilitatea magnetică a fierului va fi:

$$\mu = \mu_r \mu_0 = 650 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} = 0{,}82 \cdot 10^{-3} \left[\frac{\text{Wb}}{\text{A} \cdot \text{m}}\right].$$

— Reluctanțele magnetice ale celor trei tronsoane vor fi:

$$\mathcal{R}_1 = \frac{l_1}{\mu \cdot S_1} = \frac{5 \cdot 10^{-2}}{0{,}82 \cdot 10^{-3} \cdot 7 \cdot 10^{-4}} = 86\,000 \left[\frac{\text{A}}{\text{Wb}}\right];$$

$$\mathcal{R}_2 = \frac{l_2}{\mu \cdot S_2} = \frac{22 \cdot 10^{-2}}{0{,}82 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3}} = 268\,000 \left[\frac{\text{A}}{\text{Wb}}\right];$$

$$\mathcal{R}_3 = \frac{l_3}{\mu_0 \cdot S_2} = \frac{0{,}2 \cdot 10^{-2}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10^{-3}} = 1\,580\,000 \left[\frac{\text{A}}{\text{Wb}}\right].$$

— Reluctanța totală a circuitului va fi:

$$\mathcal{R} = \mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_2 + \mathcal{R}_3 = 1\,934\,000 \left[\frac{\text{A}}{\text{Wb}}\right].$$

Observație. Deși întrefierul este relativ mic în raport cu restul circuitului ($l_3 = 2$mm) totuși reluctanța în aer este mult mai mare decît cea în fier deoarece $\mu_0 \ll \mu$.

— Tensiunea magnetomotoare totală va fi:

$$\mathcal{F} = n_1 I_1 - n_2 I_2 + n_3 I_3 = 300 \cdot 3 - 150 \cdot 5 + 200 \cdot 8 = 1\,750 \text{ [A]}.$$

— Fluxul magnetic în circuit este:

$$\Phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}} = \frac{1\,750}{1\,934 \cdot 10^3} = 0{,}906 \cdot 10^{-3} \text{[Wb]}.$$

E. INDUCȚIA ELECTROMAGNETICĂ

1. FENOMENE DE INDUCȚIE ELECTROMAGNETICĂ

Se consideră o bobină B (fig. 3.14, *a*) avînd legat la bornele sale un ampermetru A și un magnet permanent plasat coaxial cu bobina. Ampermetrul se află pe poziția zero.

Se introduce brusc magnetul în interiorul bobinei (fig. 3.14, *b*), ceea ce are ca efect devierea într-un anumit sens (de exemplu +) a ampermetrului A.

Magnetul fiind lăsat în poziția introdusă (fig. 3.14, *c*) ampermetrul indică de asemenea zero.

La extragerea bruscă a magnetului din interiorul bobinei (fig. 3.14, *d*) ampermetrul deviază din nou, însă de data aceasta în sens contrar, după care magnetul permanent revenind la poziția inițială (fig. 3.14, *a*), acul ampermetrului revine din nou pe zero.

În locul cîmpului magnetic produs de magnetul permanent se poate folosi pentru realizarea acelorași experiențe o altă bobină parcursă de curent contin uu — electromagnet.

Această experiență ne permite să tragem următoarea concluzie: într-o bobină ia naștere o tensiune electromotoare (curent) atunci cînd fluxul magnetic prin spirele sale variază. Acest fenomen poartă numele de *inducție electromagnetică*. Tensiunea electromotoare care ia naștere prin fenomenul de inducție electromagnetică se numește *tensiune electromotoare de inducție* iar curentul produs în bobină se numește *curent de inducție*.

Aceeași experiență ne permite să mai constatăm că tensiunea electromotoare de inducție are un anumit sens atunci cînd fluxul magnetic crește (la introducreea magnetului — fig. 3.14, *b* —) și sens contrar cînd fluxul magnetic scade (la scoaterea magnetului — fig. 3.14, *d* —).

Repetînd experiența de mai sus, însă deplasînd magnetul cu viteze din ce în ce mai mari, se constată că deviația ampermetrului, deci tensiunea

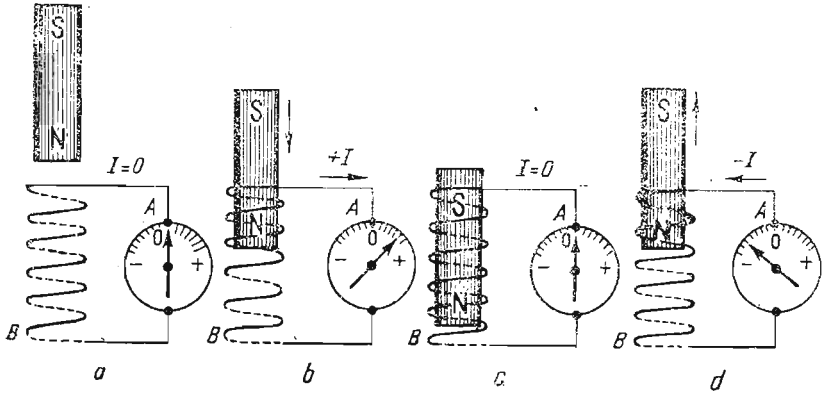


Fig. 3.14. Inducția electromagnetică într-o bobină:
a — cu magnetul în exterior; *b* — la introducerea magnetului; *c* — cu magnetul în interiorul bobinei; *d* — la scoaterea magnetului.

electromotoare indusă, cresc proporțional cu vitezele respective, de asemenea, la aceeași viteză de deplasare a magnetului, tensiunile electromotoare induse cresc proporțional cu numărul de spire al bobinei folosite.

2. LEGEA INDUCȚIEI ELECTROMAGNETICE

Pe baza experienței de mai sus s-a dedus cantitativ valoarea tensiunii electromotoare E indusă într-o bobină având n spire:

$$E = -n\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, \tag{3.32}$$

în care:

$\Delta\Phi$ reprezintă variația fluxului magnetic produs în intervalul de timp Δt.

Observație. Raportul $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ reprezintă chiar „viteza de variație" a fluxului magnetic Φ.

Trecînd la variații infinit mici ale fluxului ($d\Phi$) și ale timpului (dt) relația (3.32) se poate exprima astfel:

$$E = -n\frac{d\Phi}{dt} \tag{3.33}$$

și definește legea inducției electromagnetice.

Tensiunea electromotoare de inducție într-o bobină (spiră) este proporțională cu numărul de spire și cu viteza de variație a fluxului magnetic * prin bobina respectivă.

Pentru a se demonstra sensul fizic al semnului minus din expresia (3.33) se va recurge la următoarea experiență (fig. 3.15, *a*):

Pe un miez magnetic M se plasează o bobină „inductoare" A_1 căreia i se poate aplica un curent I_1 prin închiderea contactului K și o bobină A_2 în care se induce o tensiune electromotoare, deci care generează curentul I_2. La închiderea contactului K curentul I_1 crescînd de la valoarea zero la o valoare $I_{1\,max}$ produce fluxul magnetic Φ_1 (fluxul inductor) care are sensul

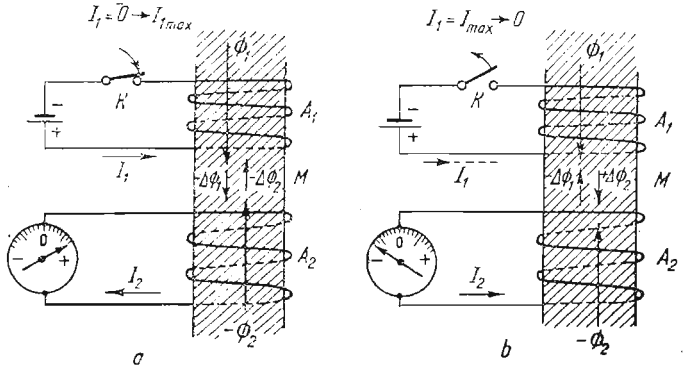


Fig. 3.15. Determinarea legii lui Lenz:
a — la stabilirea curentului; *b* — la întreruperea curentului.

* Sau: ... variația fluxului magnetic în unitatea de timp.

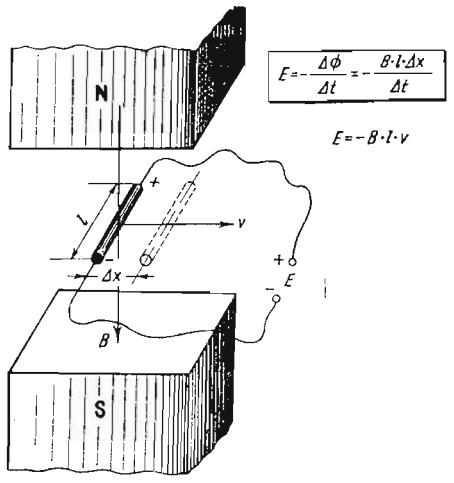


Fig. 3.16. Legea inducției electromagnetice aplicată la un conductor rectiliniu.

de creștere $+\Delta\Phi_1$ (conform legii burghiului — v. cap. 2). Curentul I_2 produs de tensiunea electromotoare indusă are sensul de circulație astfel că fluxul magnetic — Φ_2 (fluxul indus) precum și sensul de creștere al acestuia — $\Delta\Phi_2$ (determinat de asemenea conform legii burghiului) are sensul opus (— „minus") fluxului inductor.

La deschiderea contactului K curentul I_1 scade de la valoarea maximă $I_{1\,max}$ la zero (fig. 3.15, *b*) iar fluxul Φ_1 scade, sensul său de variație fiind $-\Delta\Phi_1$; ca urmare, curentul I_2 determinat de tensiunea electromotoare indusă produce o variație $+\Delta\Phi_2$ de asemenea de sens opus variației fluxului inductor.

Acest fenomen reprezintă *legea lui Lenz*, care mai poate fi enunțată și astfel: *efectul tinde să se opună cauzei care l-a produs.*

O formă particulară a fenomenului de inducție are loc la deplasarea cu viteza v a unui conductor de lungime l perpendicular pe liniile de forță ale unui cîmp de inducție B (fig. 3.16).

Considerînd că în timpul Δt conductorul efectuează o deplasare Δx aceasta corespunde unei suprafețe ΔS de linii de forță:

$$\Delta S = l\Delta x \tag{3.34}$$

sau unui flux magnetic total:

$$\Delta\Phi = B\,\Delta S = Bl\Delta x. \tag{3.35}$$

Tensiunea electromotoare indusă în conductor se obține înlocuind relația (3.35) și (3.32):

$$E = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{Bl\Delta x}{\Delta t} \tag{3.36}$$

și deoarece $\frac{\Delta x}{\Delta t} = v$ rezultă în definitiv

$$E = -Blv. \tag{3.37}$$

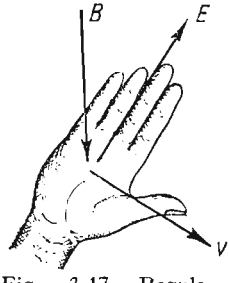


Fig. 3.17. Regula mîinii drepte.

Dacă vectorul v — viteza de deplasare a conductorului — face un unghi α cu direcția vectorului inducție B, tensiunea electromotoare de inducție se exprimă sub forma sa generală

$$E = -Blv \sin\alpha. \tag{3.38}$$

Sensul tensiunii electromotoare induse în conductor, deci sensul de circulație al unui curent I produs, dacă conductorul ar fi închis se obține cu regula mîinii drepte (fig. 3.17) și anume: ținînd mîna dreaptă cu palma

întinsă și degetul mare îndepărtat la 90° astfel ca liniile de forță ale cîmpului de inducție B să înțepe palma, iar conductorul să se deplaseze în direcția indicată de degetul mare, curentul indus, deci tensiunea indusă, va avea sensul indicat de celelalte degete.

3. INDUCTANȚĂ PROPRIE

După cum s-a arătat o bobină cu n spire parcursă de un curent I dă naștere unui cîmp magnetic H, unei inducții B sau unui flux total $\psi = n\Phi$ care sînt proporționale cu curentul I:

$$\psi = n\Phi = LI. \tag{3.39}$$

Factorul de proporționalitate L se numește *inductanța proprie* sau simplu, *inductanța** bobinei și reprezintă raportul dintre fluxul total și curentul care l-a produs:

$$L = \frac{n \cdot \Phi}{I}. \tag{3.40}$$

Considerînd o bobină cu circuit magnetic închis, de exemplu un tor, fluxul magnetic Φ produs de curentul I care parcurge cele n spire va fi conform relației (3.19).

$$\Phi = \frac{nI}{\mathcal{R}}, \tag{3.41}$$

$\mathcal{R}$ fiind reluctanța circuitului magnetic.

Înlocuind relația (3.41) în (3.40) se obține:

$$L = \frac{n}{I} \cdot \frac{nI}{\mathcal{R}} = \frac{n^2}{\mathcal{R}} = \frac{n^2}{l} S \cdot \mu. \tag{3.42}$$

Observație. Inductanța L este constantă dacă permeabilitatea magnetică este constantă, ceea ce corespunde materialelor neferomagnetice precum și celor feromagnetice funcționînd în regim nesaturat.

Unitatea de măsură a inductanței este *henry*-ul (simbol H), care are dimensiunea $\Omega \cdot s$.

$$1\ H = 1\ \Omega \cdot s.$$

4. INDUCTANȚĂ MUTUALĂ

Se consideră două bobine A_1 și A_2 (fig. 3.18) cuplate inductiv, adică cu circuit magnetic comun avînd un număr de n_1 respectiv n_2 spire și parcurse de curenții I_1 și respectiv I_2.

Fluxurile magnetice produse, Φ_1 și respectiv Φ_2, vor circula astfel:

— Fluxul Φ_1 străbătînd cele n_1 spire ale bobinei A_1 va da naștere unui flux propriu total

$$\psi_{11} = n_1 \cdot \Phi_1 = L_1 I_1. \tag{3.43}$$

* Uneori mai este numit și *autoinductanță* sau *inductivitate*.

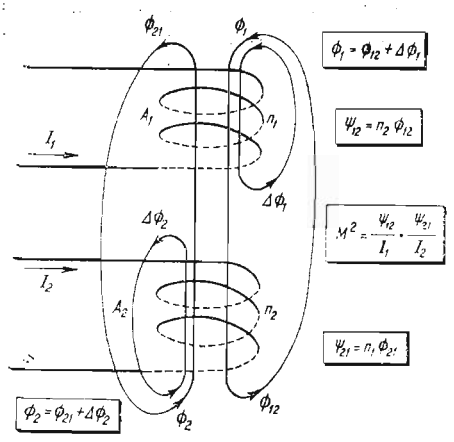


Fig. 3.18. Determinarea inductanței mutuale.

— O parte din fluxul Φ_1 închizîndu-se prin aer sub forma unui flux de scăpări $\Delta\Phi_1$ rezultă că numai o parte din fluxul Φ_1 și anume

$$\Phi_{12} = \Phi_1 - \Delta\Phi_1 = K_1 Q_1, \quad (3.44)$$

va străbate bobina A_2. Fluxul Φ_{12} prin bobina A_2 va da naștere unui flux total:

$$\psi_{12} = n_2\Phi_{12} = n_2 K_1 \Phi_1. \quad (3.45)$$

Observație. K_1 este un factor subunitar ($K_1 < 1$).

— Similar, fluxul Φ_2 străbătînd cele n_2 spire ale bobinei proprii va da naștere fluxului propriu total

$$\psi_{22} = n_2\Phi_2 = L_2 I_1. \quad (3.46)$$

— O parte din fluxul Φ_2 închizîndu-se prin aer sub forma fluxului de scăpări $\Delta\Phi_2$ rezultă că numai o parte din fluxul Φ_2 și anume

$$\Phi_{21} = \Phi_2 - \Delta\Phi_2 = K_2\Phi_2 \quad (3.47)$$

va străbate bobina A_1, astfel că fluxul total produs în bobina A_1 va fi

$$\psi_{21} = n_1\Phi_{21} = n_2 K_2 \Phi_2. \quad (3.48)$$

Ținînd seama și de relația (3.43) expresia (3.45) se mai poate scrie și astfel:

$$\psi_{12} = n_2 K_1 \Phi_1 = n_2 K_1 \frac{L_1}{n_1} I_1 = M_{12} I_1 \quad (3.49)$$

în care coeficientul de proporționalitate M_{12} definit de relația:

$$M_{12} = \frac{\psi_{12}}{I_1} = \frac{n_2}{n_1} K_1 L_1 \quad (3.50)$$

se numește *inductanța mutuală* între bobinele A_1 și A_2.

În mod similar relația (3.48) se poate scrie:

$$\psi_{21} = M_{21} I_2 \quad (3.51)$$

inductanța mutuală M_{21} între bobinele A_2 și A_1 fiind dată de relația:

$$M_{21} = \frac{\psi_{21}}{I_2} = \frac{n_1}{n_2} K_2 L_2. \quad (3.52)$$

Inductanța mutuală ca și cea proprie se măsoară în henry (H).

Se demonstrează că:

$$M_{12} = M_{21} = M. \quad (3.53)$$

Din relațiile (3.50) și (3.52) se poate scrie:

$$M^2 = \frac{\psi_{12}}{I_1}\frac{\psi_{21}}{I_2} = K_1 K_2 L_1 L_2. \quad (3.54)$$

Rezultă că inductanța mutuală M între două bobine avînd inductanțele proprii L_1 și L_2 va fi dată de relația:

$$M = \sqrt{K_1 K_2}\sqrt{L_1 L_2} = K\sqrt{L_1 L_2} \tag{3.55}$$

în care factorul $K = \sqrt{K_1 K_2} < 1$ se numește *coeficient de cuplaj* între bobine.

Dacă fluxurile de scăpări $\Delta\Phi_1$ și $\Delta\Phi_2$ sînt nule rezultă că:

$$K_1 = K_2 = 1 \Rightarrow K = 1$$

deci, inductanța mutuală capătă forma:

$$M = \sqrt{L_1 L_2}. \tag{3.56}$$

5. TENSIUNE ELECTROMOTOARE DE AUTOINDUCȚIE

Dacă un circuit electric cuprinde o bobină cu inductanța L parcursă de un curent variabil i, fluxul total produs de curentul i este de asemenea variabil

$$\psi = n\Phi = Li. \tag{3.57}$$

Conform legii inducției variația fluxului ψ va induce și în propria bobină o tensiune electromotoare e_L dată de relația:

$$e_L = -\frac{\mathrm{d}\psi}{\mathrm{d}t} = -L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}. \tag{3.58}$$

Această tensiune electromotoare produsă de variația curentului propriu al bobinei se numește *tensiune electromotoare de autoinducție.*

Tensiunea electromotoare de autoinducție este — conform legii lui Lenz — de sens contrar tensiunii aplicate bobinei respective.

F. ENERGIA CÎMPULUI MAGNETIC

O bobină avînd rezistența ohmică R și inductanța L este alimentată de la o sursă cu tensiunea electromotoare E. În conformitate cu cele arătate în paragraful precedent și cu teorema a II-a a lui Kirchhoff se va scrie:

$$E - e_L = E - L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = Ri \tag{3.59}$$

sau

$$E = Ri + L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}. \tag{3.60}$$

Înmulțind această relație cu $i \cdot \mathrm{d}t$ se obține:

$$Ei\,\mathrm{d}t = Ri^2\mathrm{d}t + Li\,\mathrm{d}i. \tag{3.61}$$

Integrînd în intervalul de timp $0—t_0$, rezultă:

$$\int_0^{t_0} Ei\mathrm{d}t = \int_0^{t_0} Ri^2\,\mathrm{d}t + \int_0^{t_0} Li\,\mathrm{d}i. \tag{3.62}$$

Termenul:

$$W_s = \int_0^{t_0} Ei \, dt = Eit_0 \tag{3.63}$$

reprezintă energia debitată de sursă, iar termenul

$$W_R = \int_0^{t_0} Ri^2 \, dt = Ri^2 t_0 \tag{3.64}$$

reprezintă energia consumată pe rezistența R (și care se transformă în căldură) în intervalul de timp considerat $(0—t_0)$.

Considerînd că în același interval de timp curentul i a variat de la 0 la I $(t = 0 \Rightarrow i = 0;\ t = t_0 \Rightarrow i = I)$ cel de al treilea termen al relației (3.62)

$$\int_0^{t_0} Li \, di = \int_0^I Ld\left[\frac{i^2}{2}\right] = L\frac{i^2}{2}\Big|_0^I = \frac{LI^2}{2} \tag{3.65}$$

reprezintă energia cîmpului magnetic:

$$W_m = \frac{LI^2}{2}. \tag{3.66}$$

La creșterea curentului energia acumulată în cîmpul magnetic crește, aceasta fiind absorbită de la cîmpul electric și invers, la scăderea curentului, cîmpul magnetic cedează energie cîmpului electric.

Relația (3.62) reprezintă așadar ecuația de bilanț energetic al unei bobine avînd rezistența ohmică R și inductanța L și fiind alimentată de la o sursă de tensiune E.

REZUMAT

● Ca și magneții permanenți curenții electrici prin conductoare produc cîmpuri magnetice în mediul înconjurător, acestea constituind împreună cu cîmpul electric care a generat acești curenți cîmpuri electromagnetice.

● Cîmpul magnetic este caracterizat prin intensitate (H), mărime care depinde de curentul care l-a produs și prin inducție magnetică (B) care depinde de mediul magnetic străbătut.

● Cîmpul magnetic exercită asupra conductoarelor parcurse de curent forțe mecanice numite forțe electromagnetice, după cum conductoarele parcurse de curent exercită între ele forțe electrodinamice de atragere sau de respingere.

● Totalitatea liniilor de forță ale unui cîmp de inducție B printr-o suprafață S constituie un flux magnetic Φ ($\Phi = BS$).

● Fluxul magnetic total ψ printr-o bobină avînd n spire reprezintă produsul între fluxul Φ ce străbate acea bobină și numărul n de spire ($\psi = n\Phi$).

● Dintre materialele magnetice în practică interesează în special cele feromagnetice care posedă permeabilități magnetice μ foarte mari.

● Circuitele magnetice se calculează folosind legea circuitului magnetic și legea curentului total.

● Inducția electromagnetică reprezintă fenomenul de producere („inducere") a unor tensiuni electromotoare în bobine (conductoare) fixe parcurse de cîmpuri magnetice variabile sau în conductoare ce se deplasează în cîmpuri magnetice invariabile.

VERIFICAREA CUNOȘTINȚELOR

1. Cîmpurile magnetice pot fi produse:
   a — numai de magneții permanenți?
   b — numai de electromagneți?
   c — de magneți permanenți și electromagneți?
2. Intensitatea cîmpului magnetic H variază în raport cu lungimea l a circuitului magnetic:
   a — direct proporțional?
   b — invers proporțional?
   c — independent?
3. Inducția magnetică B variază în raport cu permeabilitatea miezului magnetic:
   a — direct proporțional?
   b — invers proporțional?
   c — independent?
4. Fluxul magnetic Ψ străbătînd un circuit magnetic cu secțiuni din ce în ce mai mari:
   a — își sporește valoarea?
   b — își micșorează valoarea?
   c — își păstrează valoarea?
5. Pentru o bobină cu circuitul feromagnetic definit, fluxul maxim corespunde:
   a — miezului magnetic saturat?
   b — miezului magnetic nesaturat?
   c — funcționării în jurul originii curbei $B = f(H)$?
6. Pierderile în fier datorate fenomenului de histerezis sînt proporționale cu:
   a — inducția remanentă?
   b — cîmpul coercitiv?
   c — suprafața ciclului de histerezis?
7. Tensiunea electromotoare indusă într-o bobină A_2 este proporțională cu:
   a — numărul de spire n_1 al bobinei A_1 inductoare?
   b — numărul de spire n_2 al bobinei A_2 în care se induce?
   c — produsul $n_1 n_2$ al numerelor de spire?
8. Pentru o bobină dată avînd rezistența R, inductanța L și fiind alimentată cu tensiunea E curentul în circuit va fi minim cînd:
   a — viteza de variație a curentului va fi maximă?
   b — viteza de variație a curentului va fi minimă?
   c — curentul este continuu?

CAPITOLUL 4

CURENTUL ALTERNATIV

A. CURENTUL ALTERNATIV MONOFAZAT

1. PRODUCEREA CURENTULUI ALTERNATIV

Principial, curentul electric se produce pe baza fenomenului inducției electromagnetice. Într-o spiră ce se rotește și taie liniile cîmpului magnetic produs de doi poli magnetici, N și S (fig. 4.1) ia naștere o tensiune electromotoare de inducție.

Pentru înțelegerea fenomenului se va considera axa $1 - 1'$, numită *axa polilor*, și axa $O - O'$ (perpendiculară pe axa polilor), numită *axa neutră*, și se va nota cu φ unghiul pe care spira îl face la un moment dat cu axa neutră.

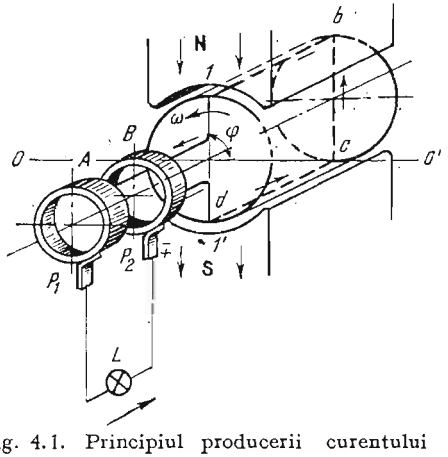


Fig. 4.1. Principiul producerii curentului alternativ.

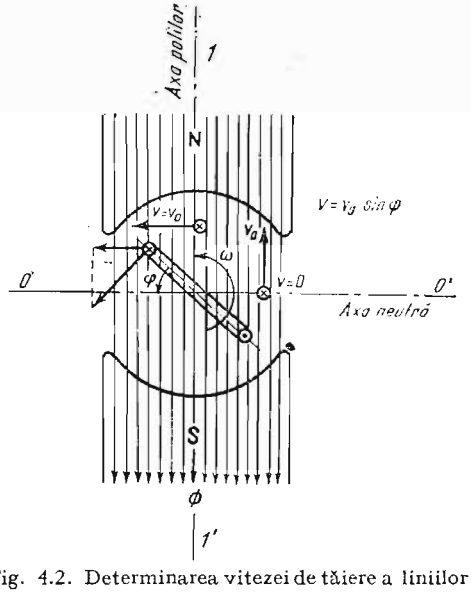


Fig. 4.2. Determinarea vitezei de tăiere a liniilor cîmpului magnetic.

Tensiunea electromotoare e_1, indusă într-un conductor de lungime l care taie cu viteza v liniile de forță ale cîmpului de inducție magnetică B este (v. relația 3.37):

$$e_1 = Blv. \tag{4.1}$$

Se observă că viteza cu care conductorul taie liniile cîmpului nu este constantă, ci depinde de unghiul φ.

Astfel (fig. 4.2):

— cînd spira se află pe axa polilor ($1 - 1'$ liniile sînt tăiate perpendicular și viteza cu care ele sînt intersectate are o valoare maximă:

$$v = v_0;$$

— cînd spira se află pe axa neutră ($O - O'$) liniile nu sînt tăiate (spira se deplasează în lungul liniei) și deci viteza este nulă:

$$v = 0;$$

— cînd spira face un unghi oarecare φ față de axa neutră, viteza de tăiere a liniilor cîmpului magnetic va fi

$$v = v_0 \sin \varphi. \tag{4.2}$$

Ca urmare, înlocuind relația (4.2) în (4.1) se va obține valoarea tensiunii e_1 indusă în conductor în cazul general:

$$e_1 = Blv_0 \sin \varphi. \tag{4.3}$$

Sensul tensiunii induse va fi dat de regula mîinii drepte, adică va avea sensul din figura 4.1.

O spiră este constituită din două conductoare dintre care unul taie liniile cîmpului într-un sens astfel că tensiunea indusă are o anumită valoare și anume sens, iar celălalt taie liniile în sens contrar, deci tensiunea indusă are aceeași valoare însă sensul contrar. Deoarece însă și poziția celui de-al doilea conductor este inversată, tensiunea electromotoare indusă într-o spiră este dată de suma celor două tensiuni egale induse în cele două conductoare:

$$e_2 = 2Blv_0 \sin \varphi. \tag{4.4}$$

În cazul în care în locul unei spire se folosește o bobină cu n spire, tensiunea indusă e are valoarea:

$$e = 2nBlv_0 \sin \varphi \tag{4.5}$$

sau

$$e = E_{max} \sin \omega t, \tag{4.6}$$

în care s-a notat:

$E_{max} = 2nBlv_0$;

$\varphi = \omega t$ (ω — viteza unghiulară a bobinei, iar t = timpul).

S-a obținut astfel o tensiune alternativă sinusoidală (fig. 4.3) care este culeasă pe inelele A și B prin periile P_1 și P_2 (fig. 4.1) și poate alimenta un consumator — de exemplu lampa L. Aceasta este forma cea mai simplă de producere a curentului alternativ monofazat, iar elementul descris constituie un generator de curent alternativ monofazat.

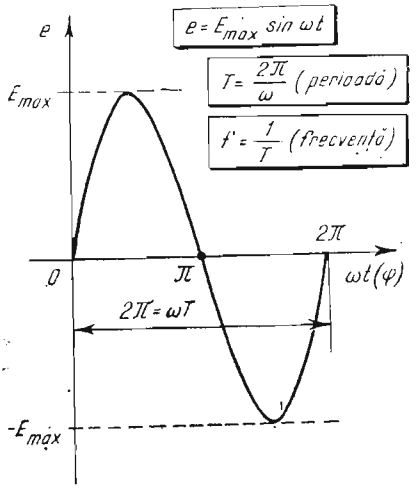


Fig. 4.3. Diagrama tensiunii alternative sinusoidale.

Fenomenul prezentat este reversibil în sensul că, aplicînd prin periile P_1 și P_2 o tensiune alternativă sinusoidală, spira (bobina) descrie o mișcare de rotație deci este capabilă să producă un lucru mecanic. S-a obținut astfel un motor de curent alternativ.

Notă. Partea formată din polii magnetici N și S constituie *statorul* (care stă) sau *inductorul* (care induce cîmp) mașinii electrice (generator sau motor), iar spira (bobina) constituie *rotorul* (care se rotește) sau *indusul* (în care se induce tensiunea) mașinii respective.

2. MĂRIMI CARACTERISTICE ALE CURENTULUI ALTERNATIV

Revenind la expresia tensiunii electromotoare deduse mai sus ($e = E_{max} \sin_{min} \omega t$) se pot defini unele mărimi caracteristice.

● **Perioada.** Dacă spira face o rotație completă (2π) în timpul T, rezultă valoarea vitezei unghiulare:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f. \tag{4.7}$$

Mărimea T se numește *perioadă* și reprezintă, după cum s-a arătat, timpul (exprimat în secunde), în care spira efectuează o rotație completă, adică timpul după care tensiunea alternativă capătă aceeași valoare și același sens de creștere.

De exemplu, pentru: $t = T$; $t = 2T$; $t = 3T$ ..., expresia $\sin \omega t$ capătă valorile: $\sin \omega T = \sin 2\pi = 1$, $\sin 2\omega t = \sin 4\pi = 1$; $\sin 3\omega T = \sin 6\pi = 1$..., adică tensiunea electromotoare capătă valoarea maximă ($e = E_{max}$).

● **Frecvența.** Mărimea $f\left(f = \frac{1}{T}\right)$ se numește *frecvență* și reprezintă numărul de perioade cuprinse într-o secundă. Frecvența se măsoară în perioade pe secundă sau *herți* (Hz). Frecvența curentului alternativ industrial din țara noastră, ca dealtfel din toată Europa*, este de 50 Hz.

● **Valoarea eficace.** Din figura 4.3 și din relația $e = E_{max} \sin \omega t$ se observă că o tensiune alternativă monofazată își schimbă sensul de 100 de ori pe secundă $\left(\frac{2 \text{ ori}}{\text{perioadă}} \times \frac{50 \text{ perioade}}{\text{secundă}}\right)$ trecînd astfel:

— de 100 de ori prin zero ($e = 0$);
— de 50 de ori prin valoarea maximă ($e = E_{max}$);
— de 50 de ori prin valoarea minimă ($e = -E_{max}$).

Măsurînd cu ajutorul unui voltmetru o asemenea tensiune alternativă, acul acestuia nu va urmări însă aceste variații, ci va indica o anumită valoare fixă E.

* În S.U.A. și în unele țări dependente economic de această țară, frecvența curentului alternativ industrial este de 60 Hz.

Această valoare a tensiunii este numită *valoare eficace* sau *valoare efectivă*. Se constată că:

$$E = \frac{E_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{E_{max}}{1{,}41}.$$

Tensiunea alternativă sinusoidală mai poate fi exprimată, prin urmare, astfel:

$$e = \sqrt{2}E \sin \omega t.$$

Aceasta înseamnă că, de exemplu, dacă voltmetrul indică $E = 100$ V, valoarea maximă (de vîrf) a tensiunii în circuit este $E_{max} = \sqrt{2} \cdot 100 = 141$ V.

Atenție! În practica curentă nu se lucrează cu valori maxime ci, de obicei, numai cu valori eficace.

Sensul fizic al noțiunii de valoare eficace a tensiunii (curentului) alternativ rezultă din efectul termic pe care o mărime electrică alternativă sinusoidală îl are asupra consumatorilor rezistivi.

În adevăr, s-a demonstrat teoretic și practic că puterea electrică disipată pe o rezistență R este aceeași fie că se folosește o tensiune continuă de valoare E, fie că se folosește o tensiune alternativă sinusoidală de valoare maximă $E_{max} = \sqrt{2}\, E$.

3. REPREZENTAREA VECTORIALĂ A MĂRIMILOR SINUSOIDALE

Rezolvarea rețelelor de curent alternativ se poate face comod folosind reprezentarea vectorială a mărimilor alternative sinusoidale. În acest scop se consideră o mărime alternativă sinudoidală exprimată într-o formă generală:

$$a = A_{max} \sin (\omega t + \varphi) \tag{4.8}$$

care poate fi reprezentată cu ajutorul construcției din figura 4.4. Față de o axă Ox denumită *axa timpului* se construiește vectorul OM de modul (mărime) A_{max} și de argument — unghi — $(\omega t + \varphi)$. Deoarece argumentul vectorului este o funcție de timp (t) rezultă că OM este un vector învîrtitor care se rotește cu viteza unghiulară ω în sens trigonometric pozitiv.

Din figura 4.4 se observă că proiecția vectorului OM pe axa Oy perpendiculară pe Ox este:

$$OA = A_{max} \sin (\omega t + \varphi) = a.$$

Ca urmare, se poate considera că vectorul OM reprezintă convențional mărimea alternativă a.

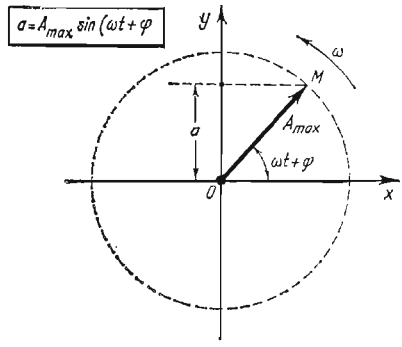


Fig. 4.4. Reprezentarea unei mărimi sinusoidale printr-un vector învîrtitor.

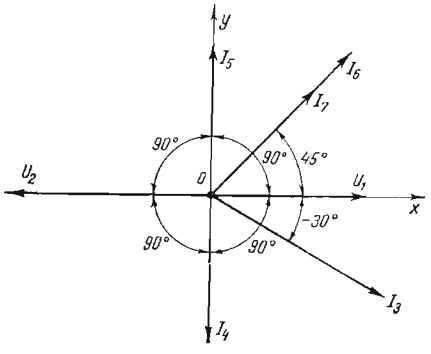


Fig. 4.5. Poziția relativă a mărimilor fazoriale.

De obicei, în cazul mărimilor electrice reprezentarea vectorială a mărimilor alternative sinusoidale se face în următoarele condiții:

— *modulul* se consideră în valoare eficace adică $A = A_{max}/\sqrt{2}$;

— *argumentul* se consideră la momentul $t = 0$, deci unghiul vectorului față de axa timpului se ia egal cu faza φ.

În acest caz reprezentarea grafică a mărimilor electrice alternative sinusoidale se simplifică considerabil. Însăși exprimarea acestor mărimi se simplifică foarte mult. De exemplu, se poate folosi notația simbolică:

$\underline{U}_1 = 220\ |30°$ (citește: 220 V, argument 30°).

Deoarece mărimile electrice alternative reprezentate sub formă de vectori se deosebesc totuși de vectorii cunoscuți din fizică (forțe, viteze etc.) ele poartă denumirea specială de *fazori* și se notează printr-o linie plasată dedesubt (de exemplu: fazorul tensiune $\underline{U}$, fazorul curent $\underline{I}$ etc.), nu deasupra ca la vectorii propriu-zis (de exemplu: vectorul forță $\vec{F}$ etc.).

În figura 4.5 sînt reprezentate ca exemplu următoarele mărimi fazoriale: $\underline{U}_1\ |0°$; $\underline{U}_2\ |180°$; $\underline{I}_3\ |-30°$; $\underline{I}_4\ |-90°$; $\underline{I}_5\ |90°$; $\underline{I}_6\ |45°$ și $\underline{I}_7\ |45°$.

În legătură cu acest exemplu se definesc următoarele poziții relative ale fazorilor:

— fazorul al cărui argument este nul este considerat ca *origine de fază* (exemplu $\underline{U}_1$);

— doi fazori avînd aceeași fază (exemplu $\underline{I}_6$ și $\underline{I}_7$) se numesc *în fază*;

— doi fazori avînd faze opuse adică diferența de fază $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 180°$ (exemplu $\underline{U}_1$ și $\underline{U}_2$ sau $\underline{I}_4$ și $\underline{I}_5$) se numesc *în opoziție de fază*;

— un fazor situat în sens trigonometric pozitiv față de alt fazor se numește *defazat înainte* față de cel de al doilea (de exemplu $\underline{I}_6$ este defazat înainte față de $\underline{U}_1$) respectiv cel de al doilea este defazat în urmă față de primul (de exemplu $\underline{I}_3$ este defazat în urmă față de $\underline{U}_1$);

— doi fazori defazați cu 90° se numesc *în cuadratură* (de exemplu $\underline{I}_4$ este în cuadratură și în urma lui $\underline{U}_1$ etc.).

3. ADUNAREA ȘI SCĂDEREA MĂRIMILOR ALTERNATIVE SINUSOIDALE

● **Adunarea.** Se consideră doi curenți alternativi de aceeași pulsație ω:

$$i_1 = I_1 \sin(\omega t + \varphi_1) \tag{4.9}$$

$$i_2 = I_2 \sin(\omega t + \varphi_2) \tag{4.10}$$

a căror reprezentare fazorială ($\underline{I}_1\ |\varphi_1$ și $\underline{I}_2\ |\varphi_2$) este dată în figura 4.6, *a*.

Fazorul sumă $\underline{I}_0\ |\varphi_0$ se obține prin însumarea vectorială a celor doi curenți.

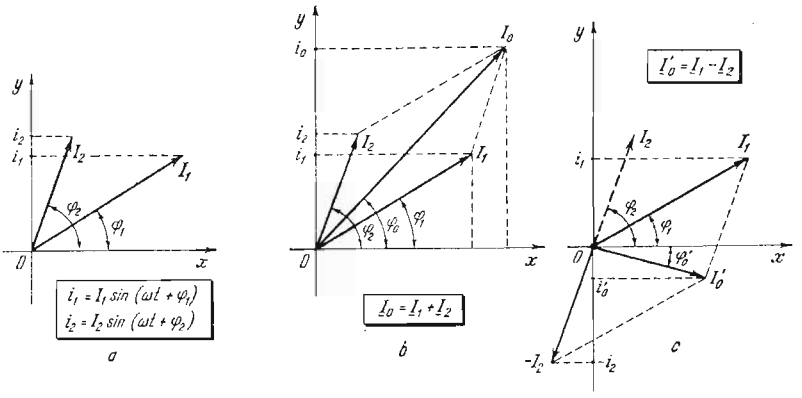


Fig. 4.6. Operații cu mărimi fazoriale:
a — reprezentarea a doi fazori; *b* — suma fazorilor; *c* — diferența fazorilor.

Deoarece — după cum se știe din calculul vectorial, — proiecția pe o dreaptă oarecare a rezultantei este egală cu suma proiecțiilor vectorilor componenți, pentru a calcula modulul și argumentul curentului I_0 se procedează astfel:

Se proiectează fazorii $\underline{I}_1$, $\underline{I}_2$ și $\underline{I}_0$ pe axa ordonatelor și a absciselor și se scrie succesiv (fig. 4.6, *b*):

$$I_0 \sin \varphi_0 = I_1 \sin \varphi_1 + I_2 \sin \varphi_2 \tag{4.11}$$

$$I_0 \cos \varphi_0 = I_1 \cos \varphi_1 + I_2 \cos \varphi_2. \tag{4.12}$$

Ridicînd la pătrat ambele relații și însumînd membru cu membru se obține $I_0^2 \sin^2 \varphi_0 + I_0^2 \cos^2 \varphi_0 = (I_1 \sin \varphi_1 + I_2 \sin \varphi_2)^2 + (I_1 \cos \varphi_1 + I_2 \cos \varphi_2)^2$.

Efectuînd operațiile și ținînd seama de faptul că $\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi = 1$ se obține:

$$I_0^2 = I_1^2 + I_2^2 + 2I_1 I_2 (\sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2)$$

și deoarece:

$$\sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 = \cos (\varphi_1 - \varphi_2)$$

rezultă expresia modulului (valorii) curentului sumă:

$$I_0 = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + 2I_1 I_2 \cos (\varphi_1 - \varphi_2)}. \tag{4.13}$$

Revenind la relațiile (4.11) și (4.12) și împărțindu-le membru cu membru se obține:

$$\frac{I_0 \sin \varphi_0}{I_0 \cos \varphi_0} = \frac{I_1 \sin \varphi_1 + I_2 \sin \varphi_2}{I_1 \cos \varphi_1 + I_2 \cos \varphi_2} = \operatorname{tg} \varphi_0. \tag{4.14}$$

Deci, argumentul curentului sumă va fi:

$$\varphi_0 = \operatorname{arctg} \frac{I_1 \sin \varphi_1 + I_2 \sin \varphi_2}{I_1 \cos \varphi_1 + I_2 \cos \varphi_2}. \tag{4.15}$$

● **Scăderea.** Pentru a determina diferența $i_0 = i_1 - i_2$ a două mărimi alternative sinusoidale se scrie:

$$i_0 = i_1 + (-i_2),$$

adică se efectuează operația de adunare a fazorului $\underline{I}_1$ cu fazorul $\underline{I}_2$ luat în opoziție de fază $(-\underline{I}_2)$ — (fig. 4.6, *c*).

În mod similar se obține:

$$I_0' = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 - 2I_1I_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)} \tag{4.16}$$

$$\varphi_0' = \operatorname{arctg} \frac{I_1 \sin \varphi_1 - I_2 \sin \varphi_2}{I_1 \cos \varphi_1 - I_2 \cos \varphi_2}. \tag{4.17}$$

B. CIRCUITE DE CURENT ALTERNATIV MONOFAZAT

1. STRUCTURA CIRCUITELOR DE CURENT ALTERNATIV

Spre deosebire de circuitele de curent continuu, în curent alternativ pe lîngă rezistoare (rezistențe R) se întîlnesc și alte elemente pasive și anume: bobine (inductanțe L) și condensatoare (capacități C).

După cum se va vedea, cele trei tipuri de elemente R, L și C se comportă în mod diferit în circuitele de curent alternativ.

2. CIRCUIT CU REZISTENȚĂ R

Considerînd o sursă de tensiune alternativă

$$e = \sqrt{2}\, E \sin \omega t \tag{4.18}$$

care alimentează o rezistență R (fig. 4.7, *a*), expresia curentului alternativ care străbate circuitul va fi (conform legii lui Ohm):

$$i = \frac{e}{R} = \sqrt{2}\frac{E}{R} \sin \omega t = \sqrt{2} I \sin \omega t.$$

Se constată următoarele (fig. 4.7, *b*):

— curentul obținut este tot alternativ sinusoidal, valoarea sa eficace (indicată de un ampermetru) fiind:

$$I = \frac{E}{R}; \tag{4.20}$$

— curentul I este în fază cu tensiunea E, deoarece i și e se anulează (trec prin zero) și au maximele în același moment, fapt care rezultă și din diagrama fazorială (fig. 4.7, *c*).

Cele arătate mai sus sînt valabile și dacă se consideră că un curent,

$$i = \sqrt{2} I \sin \omega t \tag{4.21}$$

parcurge o rezistență R.

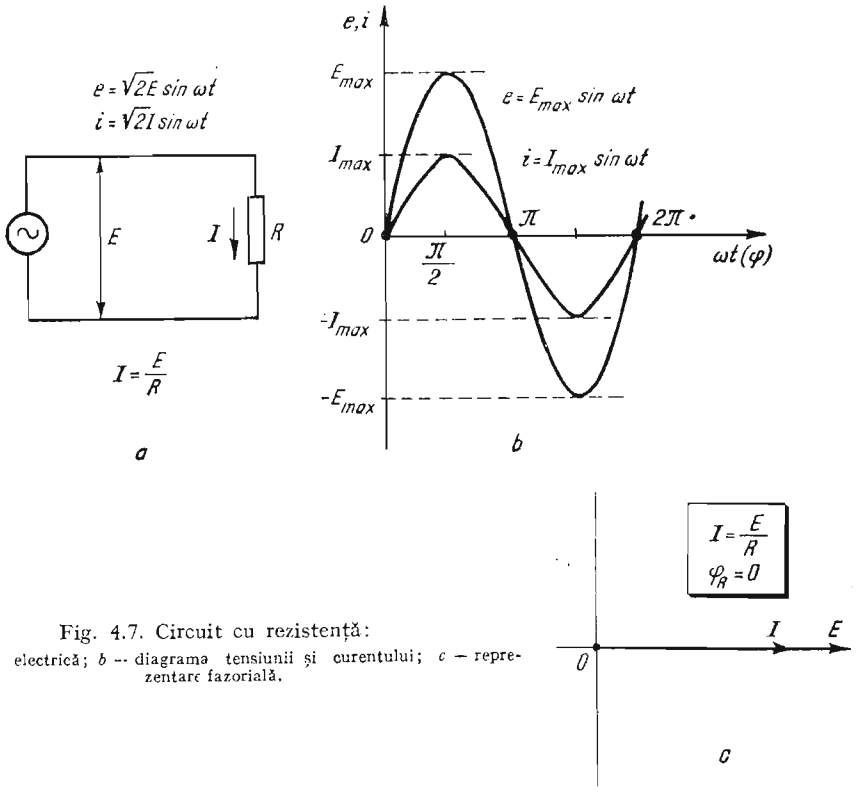


Fig. 4.7. Circuit cu rezistență:
— schema electrică; *b* — diagrama tensiunii și curentului; *c* — reprezentare fazorială.

În această situație, la bornele rezistenței se obține o cădere de tensiune

$$e = \sqrt{2}\, RI \sin \omega t = \sqrt{2}\, E \sin \omega t$$

a cărei valoare eficace este:

$$E = RI \tag{4.22}$$

și care este în fază cu curentul I.

3. CIRCUIT CU INDUCTANȚĂ L

Considerîndu-se aceeași sursă de tensiune alternativă

$$e = \sqrt{2}\, E \sin \omega t$$

aplicată unei bobine avînd inductanța L (fig. 4.8, *a*), se constată că ia naștere un curent alternativ:

$$i = \sqrt{2}\, \frac{E}{\omega L} \cos\, \omega t = \sqrt{2} I \cos\, \omega t. \tag{4.23}$$

Se observă următoarele (fig. 4.8, *b*):

— curentul obținut este tot alternativ sinusoidal, valoarea sa eficace fiind:

$$I = \frac{E}{\omega L} = \frac{E}{X_L} \tag{4.24}$$

în care mărimea $X_L = \omega L$ poartă numele de *reactanță inductivă* și, ca și rezistența, se măsoară în ohmi;

— curentul i mai poate fi exprimat și sub forma:

$$i = \sqrt{2}I \cos \omega t = \sqrt{2}I \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

și este deci în cuadratură și defazat în urmă față de tensiunea E cu un unghi φ (fig. 4.8, *c*):

$$\varphi_L = -\frac{\pi}{2} = -90°.$$

Cele de mai sus sînt valabile și în cazul în care un curent:

$$i = \sqrt{2}I \sin \omega t$$

parcurge inductanța L.

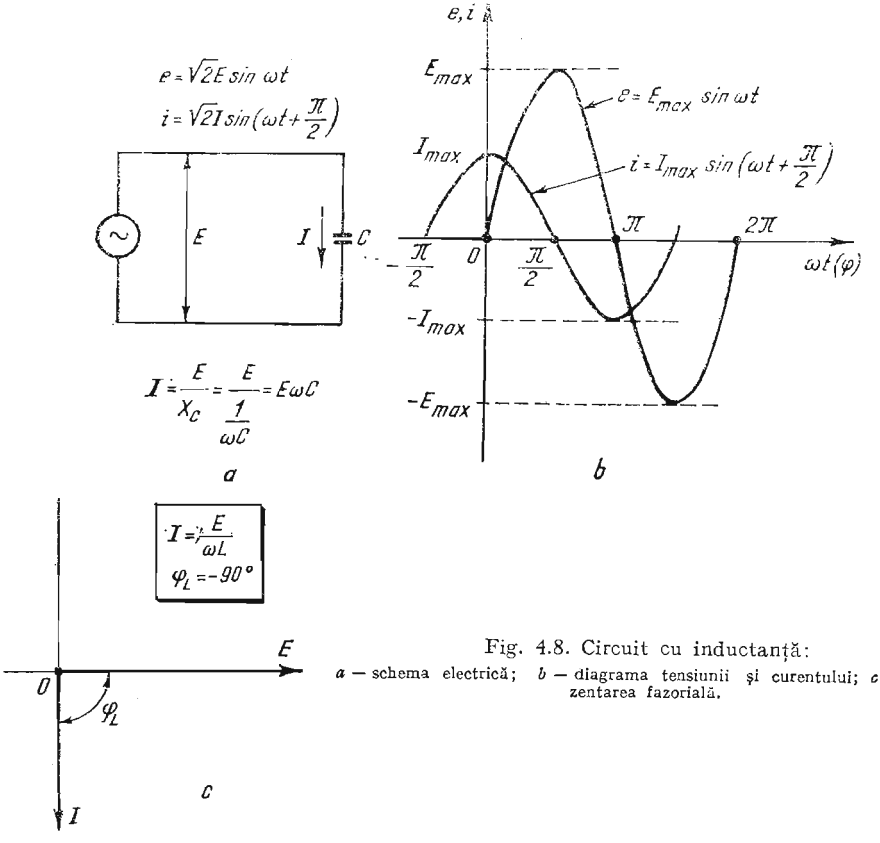


Fig. 4.8. Circuit cu inductanță:
a — schema electrică; *b* — diagrama tensiunii și curentului; *c* — reprezentarea fazorială.

În această situație la bornele inductanței se obține căderea de tensiune:

$$e = \sqrt{2}\omega L I \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \tag{4.25}$$

a cărei valoare eficace este:

$$E = \omega L I = X_L I \tag{4.26}$$

și care este defazată înainte de curentul I cu unghiul $\varphi_L = \frac{\pi}{2} = +90°$.

4. CIRCUIT CU CAPACITATE C

Considerînd din nou aceeași sursă de tensiune alternativă:

$$e = \sqrt{2}E \sin \omega t$$

aplicată unei capacități C (fig. 4.9, *a*), se constată că în circuit ia naștere un curent alternativ:

$$i = -\sqrt{2}\frac{E}{\frac{1}{\omega C}} \cos \omega t = -\sqrt{2} I \cos \omega t. \tag{4.27}$$

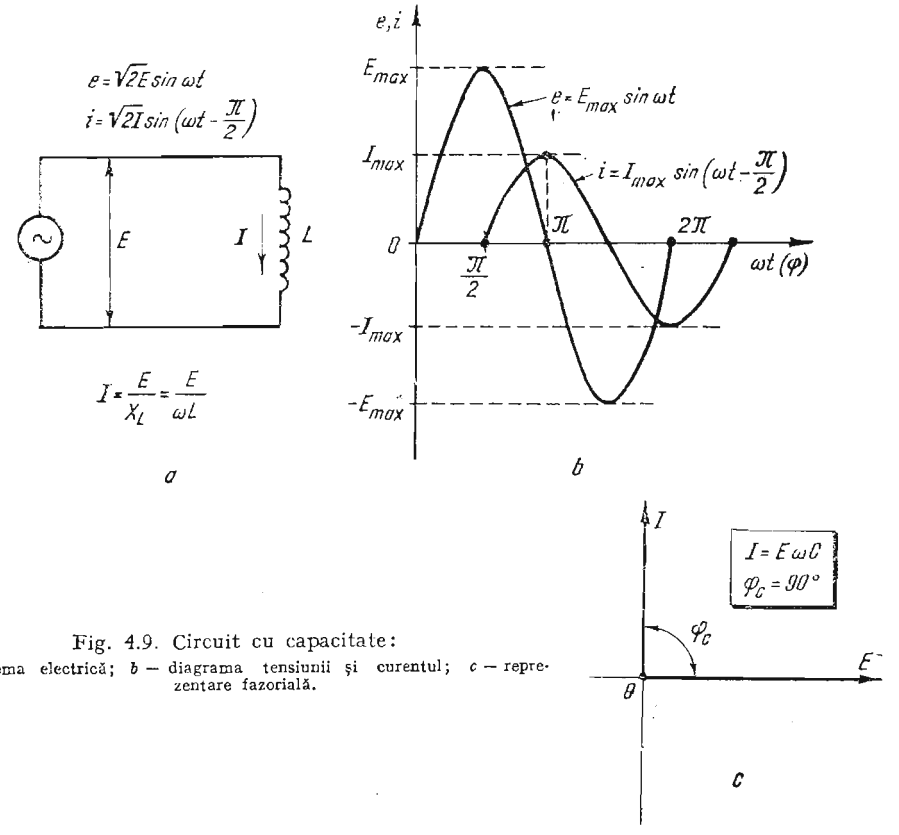


Fig. 4.9. Circuit cu capacitate:
a — schema electrică; *b* — diagrama tensiunii și curentul; *c* — reprezentare fazorială.

Se observă că (fig. 4.9, *b*):

— curentul obținut este tot alternativ sinusoidal, avînd valoarea eficace

$$I = \frac{E}{\frac{1}{\omega C}} = \frac{E}{X_C}, \tag{4.28}$$

în care mărimea X_c este *reactanța capacitivă* și se măsoară tot în ohmi;

— curentul i mai poate fi exprimat sub forma:

$$i = -\sqrt{2}I \cos \omega t = \sqrt{2}I \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \tag{4.29}$$

și este deci în cuadratură și defazat înainte față de tensiunea E cu un unghi φ_C (fig. 4.9, *c*):

$$\varphi_C = \frac{\pi}{2} = +\ 90°.$$

Cele de mai sus sînt valabile și în cazul în care un curent

$$i = \sqrt{2}I \sin \omega t$$

străbate capacitatea C.

În această situație, la bornele capacității se obține o cădere de tensiune:

$$e = \sqrt{2}\frac{I}{\omega C} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right),$$

a cărei valoare eficace este

$$E = \frac{I}{\omega C} = X_C I$$

și care este defazată în urmă față de curentul I cu unghiul $\varphi_C = -\frac{\pi}{2} = -\ 90°$.

5. CIRCUIT R, L, C SERIE

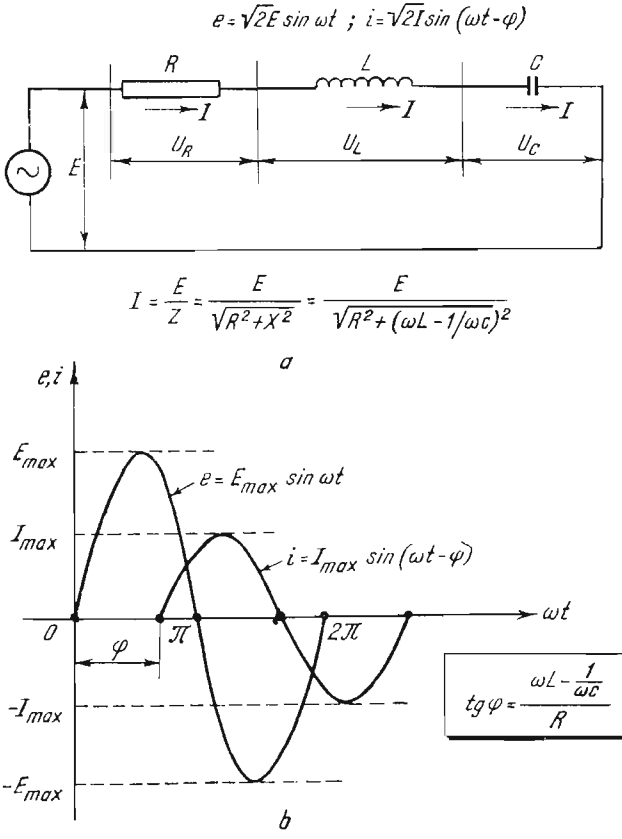
În cazul general (fig. 4.10, *a*), prin aplicarea unei tensiuni alternative de valoare eficace E în circuitul respectiv se obține un curent de asemenea alternativ, avînd (fig. 4.10, *b*):

— valoarea eficace:

$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{E}{Z}; \tag{4.30}$$

— defazajul φ dat de expresia (fig. 4.10, *c*):

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{X}{R}. \tag{4.31}$$



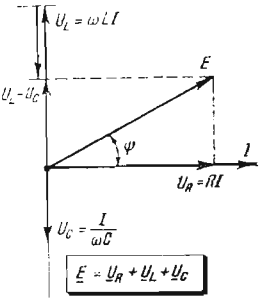


Fig. 4.10. Circuit *R*, *L*, *C* serie:
a — schema electrică; *b* — diagrama tensiunii și curentului; *c* — reprezentarea fazorială.

Mărimea Z se numește *impedanța circuitului* și este dată de expresia:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + X^2}.$$

Prin $X = X_L - X_C$ s-a notat reactanța totală a circuitului.

Impedanța Z (ca și R și X) se măsoară în ohmi.

Legea lui Ohm ($E = RI$) este valabilă și în curent alternativ, însă sub forma:

$$E = ZI \tag{4.32}$$

în expresia impedanței Z intervenind pe lîngă rezistență, și reactanța totală a circuitului.

6. REZONANȚA SERIE

Se consideră un circuit serie ca cel din figura 4.10 avînd cei trei parametri R, L și C de valori fixe.

Ținînd seama de expresia pulsației [relația (4.7)] reactanțele inductivă și capacitivă se pot exprima astfel:

$$X_L = \omega L = 2\pi f L \tag{4.33}$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\cdot\pi f C}\,. \tag{4.34}$$

Presupunînd că tensiunea sursei de alimentare E se menține constantă însă frecvența f variază continuu, se constată că cele două reactanțe variază direct proporțional (X_L), respectiv invers proporțional (X_C) cu frecvența.

Reprezentînd pe aceeași diagramă (fig. 4.11) funcțiile $X_L = f_1(f)$ și $X_C = f_2(f)$ se observă că acestea reprezintă o dreaptă trecînd prin origine respectiv o hiperbolă echilaterală.

Observație. Cînd frecvența este nulă * ($f = 0$), $X_L = 0$ — nu există tensiune electromotoare de autoinducție — și $X_C = \infty$ — circuitul este întrerupt iar cînd $f \to \infty$, $X_L \to \infty$ — circuit întrerupt — și $X_C = 0$ — capacitatea este în scurtcircuit.

Din figura 4.11 se constată că există o singură frecvență f_0 pentru care:

$$X_L = X_C \Rightarrow 2\pi f_0 L = \frac{1}{2\cdot\pi f_0 C} \tag{4.35}$$

de unde rezultă:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}\,. \tag{4.36}$$

Din relația (4.30) rezultă că în acest caz deoarece $X_L - X_C = 0$, valoarea curentului devine:

$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2}} = \frac{E}{R} = I_{max}. \tag{4.37}$$

Curentul a căpătat o valoare maximă ca și cum în circuit ar fi rămas numai rezistența R, cele două reactanțe anulîndu-se reciproc.

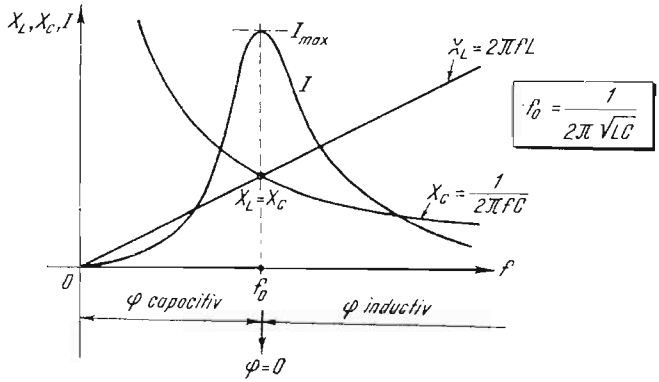


Fig. 4.11. Variația reactanțelor și a curentului în funcție de frecvență.

*Sursa devine de curent continuu ($f = 0$).

Din relația (4.31) rezultă de asemenea că în această situație defazajul φ devine:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{X_L - X_C}{R} = 0 \Rightarrow \varphi = 0 \tag{4.38}$$

adică curentul este în fază cu tensinnea.

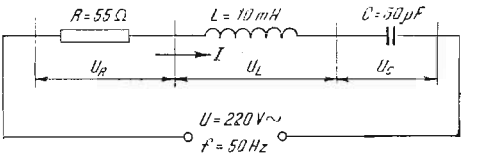


Fig. 4.12. Exemplu de circuit R, L, C serie (aplicația 4.1).

Acest fenomen, caracterizat de relațiile (4.35) ... (4.38), se numește *rezonanță serie* a circuitului R, L, C, iar f_0 este *frecvența de rezonanță* a circuitului.

În figura 4.11 s-a trasat și funcția $I = f_3(f)$ calculată pe baza relației (4.30).

Observații.

— Pentru $f = 0 \Rightarrow X_C = \infty \Rightarrow I = 0$.

— Pentru $f = \infty \Rightarrow X_L = \infty \Rightarrow I = 0$.

— Pentru $f = f_0 \Rightarrow X_L - X_C = 0 \Rightarrow I = I_{max}$.

Aplicația 4.1. Să se rezolve circuitul R, L, C serie avînd parametrii din figura 4.12, frecvența nominală a rețelei fiind 50 Hz. Se va calcula și frecvența de rezonanță a circuitului.

Răspuns. Se calculează succesiv:

— pulsația:

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 50 = 314 \cdot s^{-1}$$

— reactanță inductivă:

$$X_L = \omega L = 314 \cdot 320 \cdot 10^{-3} = 100\ \Omega$$

— reactanța capacitivă:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{314 \cdot 50 \cdot 10^{-6}} = 64\ \Omega$$

— impedanța circuitului:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{55^2 + (100 - 64)^2} = 66\ \Omega.$$

Observație. Impedanța totală este mai mică decît reactanța inductivă care este parte constitutivă a impedanței ($Z < X_L$).

— Curentul în circuit este:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{220}{66} = 3{,}34\ \text{A}.$$

— Faza curentului este:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{36}{55} = 0{,}65 \Rightarrow \varphi = 33° \text{ inductiv}.$$

— Căderile de tensiune pe fiecare element vor fi:

$$U_R = RI = 55 \cdot 3{,}34 = 184\ \text{V};$$
$$U_L = X_L I = 100 \cdot 3{,}34 = 334\ \text{V};$$
$$U_C = X_C I = 64 \cdot 3{,}34 = 214\ \text{V}.$$

Observație. Căderea de tensiune pe un element ($U_L = 334$ V) este mai mare decît tensiunea sursei ($U = 220$ V).

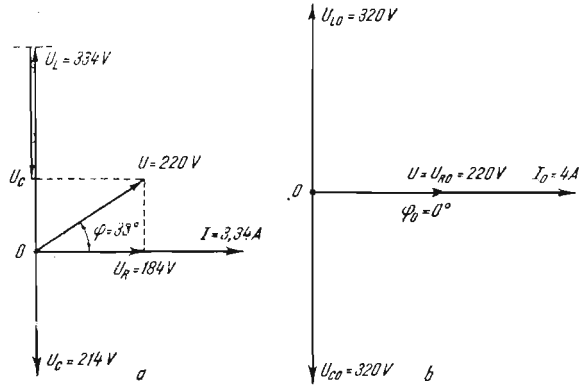


Fig. 4.13. Reprezentarea fazorială a tensiunilor (aplicația 4.1):
a — pentru frecvența de 50 Hz; *b* — pentru frecvența de rezonanță (40 Hz).

Cu ajutorul valorilor obținute mai sus se trasează diagrama fazorială din figura 4.13, *a*.

— Frecvența de rezonanță a circuitului este:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{320 \cdot 10^{-3} \cdot 50 \cdot 10^{-6}}} = 40 \text{ Hz}$$

— Curentul la rezonanță este:

$$I_0 = \frac{U}{R} = \frac{220}{55} = 4 \text{ A}$$

— Reactanțele la rezonanță vor fi:

$$X_{L0} = \omega_0 L = 2 \cdot \pi \cdot 40 \cdot 320 \cdot 10^{-3} = 80\ \Omega$$

$$X_{C0} = \frac{1}{\omega_0 C} = \frac{1}{2\pi \cdot 40 \cdot 40 \cdot 50 \cdot 10^{-6}} = 80\ \Omega = X_L$$

— Căderile de tensiune la rezonanță vor fi:

$$U_{R0} = RI_0 = 55 \times 4 = 220 \text{ V}$$

$$U_{L0} = X_{L0} I_0 = 80 \times 4 = 320 \text{ V}.$$

$$U_{C0} = X_{C0} I_0 = 80 \times 4 = 320 \text{ V}.$$

Cu ajutorul valorilor obținute se trasează diagrama fazorială din figura 4.13, *b*.

7. CIRCUIT *R*, *L*, *C* PARALEL

În cazul în care cele trei elemente pasive *R*, *L* și *C* sînt legate în derivație (fig. 4.14, *a*) prin aplicarea unei tensiuni alternative de valoarea eficace *E* fiecare element absoarbe curentul (fig. 4.14, *b*):

$$I_R = \frac{E}{R}; \quad I_L = \frac{E}{X_L} = \frac{E}{\omega L}; \quad I_C = \frac{E}{X_C} = E\omega C$$

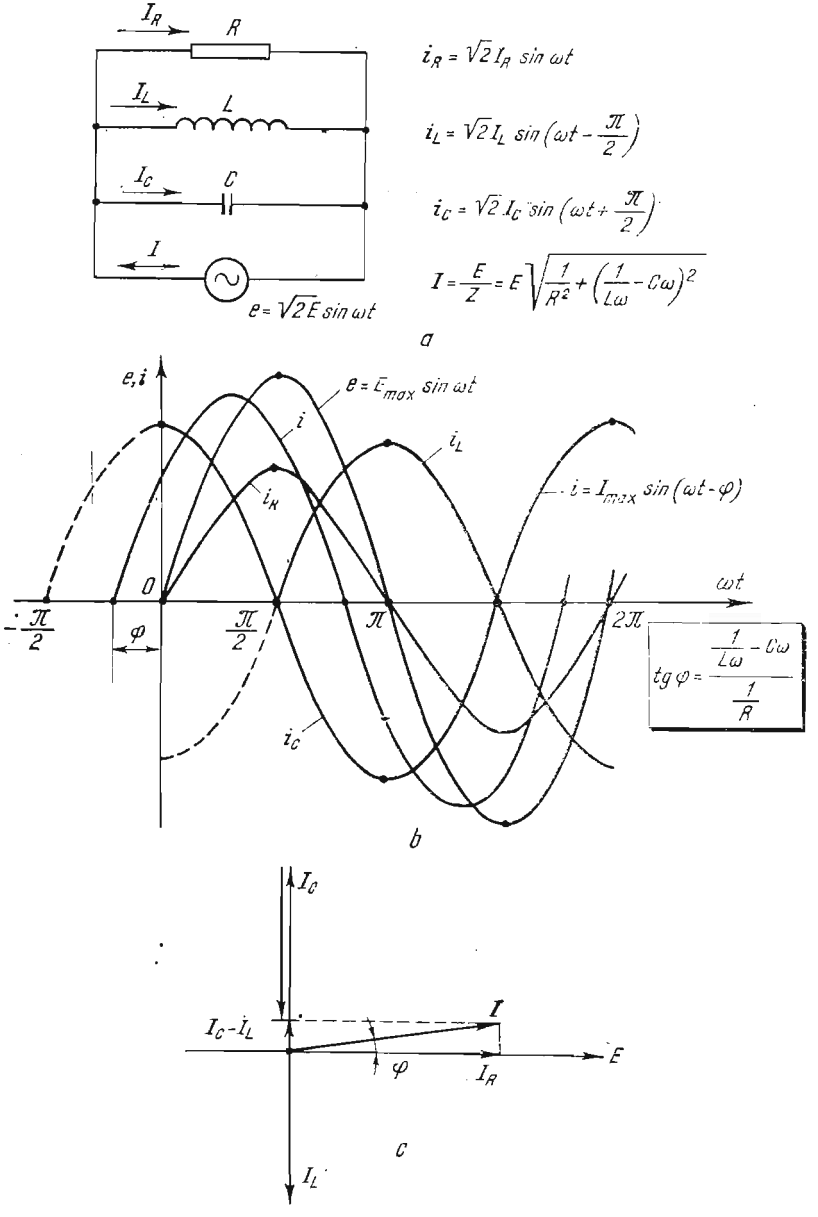


Fig. 4.14. Circuit R, L, C derivație:
a — schema electrică; *b* — diagrama tensiunii și curenților; *c* — reprezentarea fazorială.

Din diagrama fazorială (fig. 4.14, *c*) se constată că curentul $\underline{I}$ debitat de sursă va fi dat de suma fazorială a celor trei curenți:

$$\underline{I} = \underline{I}_R + \underline{I}_L + \underline{I}_C \tag{4.39}$$

Rezultă pentru curentul total:
— valoarea eficace

$$I = E\sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{L\omega} - C\omega\right)^2} = \frac{E}{Z} \tag{4.40}$$

— defazajul φ, dat de expresia (fig. 4.14, *c*)

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\frac{1}{L\omega} - C\omega}{\frac{1}{R}} = R\left(\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C}\right). \tag{4.41}$$

Impedanța circuitului rezultă din expresia (4.40)

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{L\omega} - C\omega\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C}\right)^2}} \tag{4.42}$$

8. REZONANȚA PARALELĂ

Din relația (4.40) se observă că și în cazul circuitului R, L, C paralel se obține fenomenul de rezonanță (rezonanța paralelă) dacă:

$$\frac{1}{L\omega} - C\omega = 0 \Rightarrow \omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Frecvența de rezonanță este dată de aceeași expresie ca și în cazul rezonanței serie:

$$\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}; \quad f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{LC}} \tag{4.43}$$

Deoarece în acest caz $\frac{1}{X_L} = \frac{1}{X_C}$ valoarea eficace a curentului este maximă și străbate numai rezistența R,

$$I = \frac{R}{E} = I_{max}$$

iar faza sa devine (relația 4.41):

$$\operatorname{tg}\varphi = 0 \Rightarrow \varphi = 0$$

Ceilalți doi curenți sînt egali și în opoziție de fază

$$I_L = \frac{E}{\omega L} = E \cdot \omega \cdot C = I_C$$

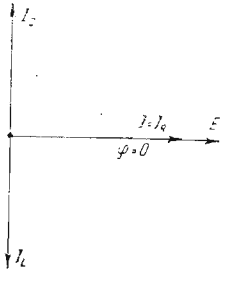


Fig. 4.15. Diagrama fazorială la rezonanța paralelă.

Diagrama fazorială în cazul rezonanței paralele este prezentată în figura 4.15.

9. LEGEA LUI OHM ȘI TEOREMELE LUI KIRCHHOFF ÎN CURENT ALTERNATIV

Din cele arătate mai sus a rezultat că legile folosite în curent continuu sînt valabile și în curentul alternativ cu observația că mărimile intervin fazorial.

● **Legea lui Ohm:**

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}}; \text{ sau } \underline{U} = \underline{Z}\,\underline{I}; \text{ sau } \underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}}. \tag{4.43}$$

● **Teorema I a lui Kirchhoff:**

$$\Sigma \underline{I} = 0.$$

Suma fazorială a curenților care intră într-un nod al rețelei este nulă (v. relația 4.39).

● **Teorema a II-a a lui Kirchhoff:**

$$\Sigma \underline{E} = \Sigma \underline{Z}\,\underline{I}. \tag{4.44}$$

Într-un circuit închis al unei rețele suma fazorială a tensiunilor electromotoare este egală cu suma fazorială a căderilor de tensiune.

C. CURENTUL ALTERNATIV TRIFAZAT

1. PRODUCEREA CURENTULUI ALTERNATIV TRIFAZAT

Reluînd experiența din figura 4.1, însă folosind în loc de o spiră (bobină) care se rotește în cîmpul magnetic, un număr de trei spire decalate în spațiu la unghiuri egale $\left(\frac{2\pi}{3} = 120°\right)$(fig. 4.16) se vor obține trei tensiuni monofazate e_1, e_2, e_3 egale ca valori maxime ($E_{max} = E_{1max} = E_{2max} = E_{3max}$) și deci egale ca valori eficace ($E = E_1 = E_2 = E_3$), însă defazate cu unghiuri $\varphi = \frac{2\pi}{3}$:

$$\left.\begin{aligned} e_1 &= \sqrt{2}E \cdot \sin \omega t, \\ e_2 &= \sqrt{2}E \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right), \\ e_3 &= \sqrt{2}E \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right). \end{aligned}\right\} \tag{4.45}$$

Un asemenea sistem poartă numele de *sistem trifazat* de tensiuni, iar mașina electrică ce-l produce se numește *generator trifazat.*

În figura 4.17 este prezentată diagrama fazorială a sistemului trifazat de tensiuni.

Cele trei spire (bobinaje) pot alimenta teoretic trei impedanțe de sarcină Z_1, Z_2 și Z_3 prin trei circuite independente (fig. 4.18).

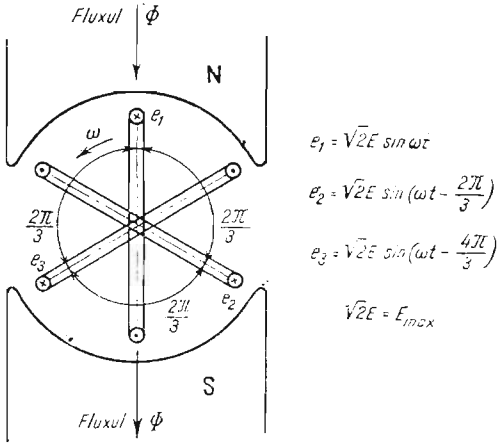


Fig. 4.16. Principiul producerii curentului alternativ trifazat.

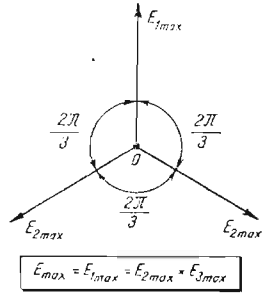


Fig. 4.17. Diagrama fazorială la un sistem trifazat.

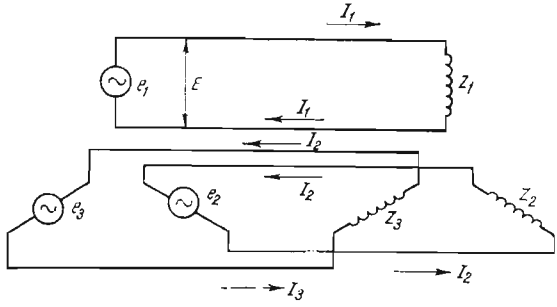


Fig. 4.18. Sistem trifazat alimentînd trei sarcini monofazate (schemă teoretică).

Practic, în scopul reducerii numărului de conductoare, cele trei bobinaje (generatoare) precum și cele trei impedanțe (consumatoare) sînt legate în diverse moduri, anumite *conexiuni*.

3. CONEXIUNEA ÎN STEA CU FIR NEUTRU

Bobinajele (înfășurările) generatorului sau impedanțele de sarcină (de exemplu fazele unui motor) se leagă ca în figura 4.19, numită legare sau conexiune *în stea*. Punctul comun al celor trei bobinaje ale generatorului (notat cu O_G) precum și al celor trei impedanțe de sarcină (O_S) se numește *punct neutru* sau *nul*, iar conductorul de legătură între cele două puncte neutre se numește *conductor neutru* sau *de nul*. Celelalte trei conductoare se numesc *conductoare active* sau *faze* și se notează, de obicei, cu R, S și T.

Tensiunea fiecărei faze, măsurată între conductorul de fază și nul, se numește *tensiune pe fază* ($E_{R0} = E_{S0} = E_{T0} = E_0$), iar tensiunea între conductoarele active se numește *tensiunea între faze* ($U_{RS} = U_{ST} = U_{TR}$).

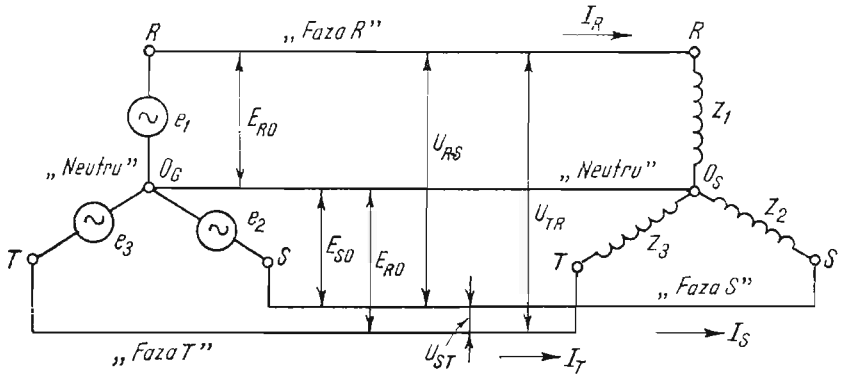


Fig. 4.19. Conexiune în stea cu fir neutru.

Din diagrama fazorială (fig. 4.20) se constată de pildă că:

$$\underline{U}_{RS} = \underline{E}_{R0} - \underline{E}_{S0}$$

sau, exprimînd în modul:

$$U_{RS} = 2E_0 \cdot \cos 30° = 2E_0 \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3}E_0.$$

Tensiunea între faze este așadar de $\sqrt{3}$ ori mai mare decît cea pe fază:

$$U = \sqrt{3}E. \qquad (4.46)$$

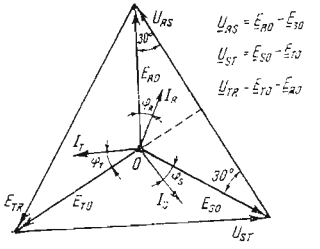


Fig. 4.20. Diagrama fazorială a tensiunilor între faze.

De exemplu, tensiunea de alimentare a locuințelor este de obicei $E = 220$ V fiind distribuită de la o fază și nul (tensiunea pe fază) a unui sistem trifazat cu conexiune în stea cu fir neutru avînd $U = 380$ V tensiune între faze ($380 = \sqrt{3} \cdot 220$).

3. CONEXIUNEA ÎN STEA FĂRĂ FIR NEUTRU

Această conexiune este asemănătoare celei precedente, cu observația că firul neutru lipsește (fig. 4.21).

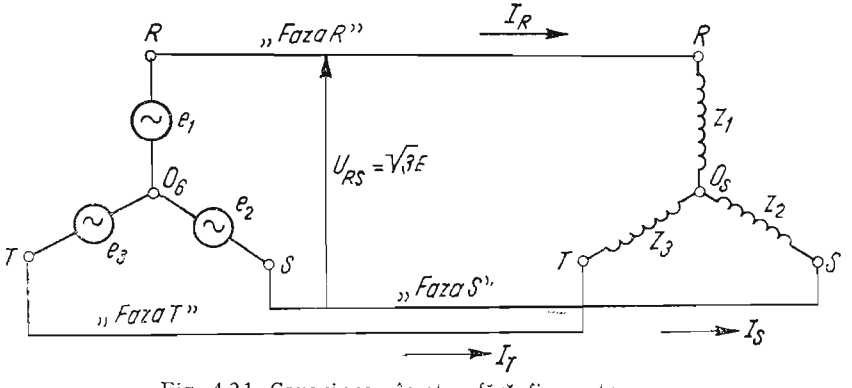


Fig. 4.21. Conexiunea în stea fără fir neutru.

Se realizează ca în figura 4.22 înfășurările fiind legate două cîte două între ele. Se constată că în acest caz tensiunea pe o fază (înfășurare) este aceeași cu tensiunea între faze ($E = U$).

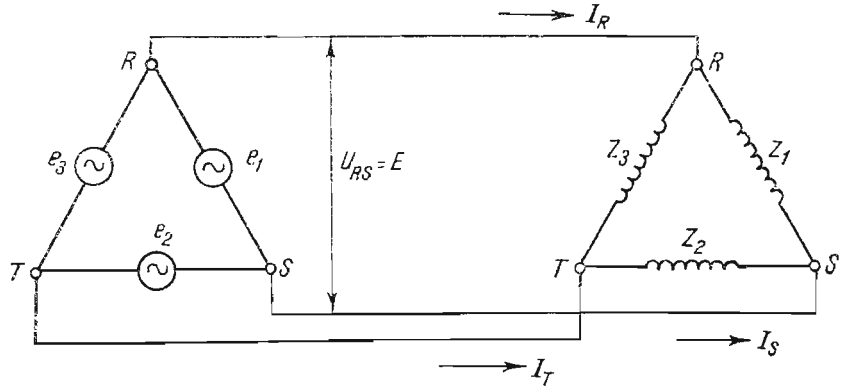


Fig. 4.22. Conexiune în triunghi.

Atenție! Conexiunile la generator și consumator pot fi diferite adică, de exemplu, generatorul poate fi conectat în stea iar consumatorul (motorul) în triunghi.

D. PUTEREA ÎN CURENT ALTERNATIV

1. INTRODUCERE

Spre deosebire de curentul continuu unde puterea electrică reprezintă produsul între tensiune și curent ($P = UI$) în curent alternativ trebuie să se țină seama de faptul că tensiunea nu este întotdeauna în fază cu curentul existînd de obicei un unghi de fază φ.

Considerînd de exemplu un circuit R, L serie alimentat de tensiunea U (fig. 4.23, *a*) curentul I străbătînd circuitul respectiv va provoca:

— o cădere de tensiune pe rezistența R care va fi în fază cu curentul I

$$U_R = RI; \quad \varphi_R = 0; \tag{4.47}$$

— o cădere de tensiune pe inductanța L care va fi defazată înaintea curentului I cu unghiul $\frac{\pi}{2}$:

$$U_L = \omega \cdot LI; \quad \varphi_L = \frac{\pi}{2}. \tag{4.48}$$

Din diagrama fazorială (fig. 4.23, *b*) se constată că, conform teoremei a II-a a lui Kirchhoff (relația 4.44) se poate scrie:

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L;$$

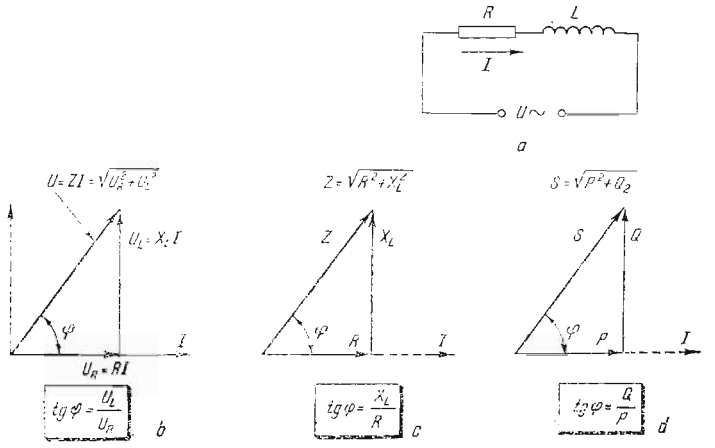


Fig. 4.23. Puterea în curent alternativ:
a — schema electrică; *b* — triunghiul tensiunilor; *c* — triunghiu impedanței; *d* — triunghiul puterilor.

sau, în module:

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} = \sqrt{R^2I^2 + \omega^2L^2I^2} = I\sqrt{R^2 + \omega^2L^2} = IZ \qquad (4.49)$$

Rezultă conform și cu relațiile (4.30) și (4.31):

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \omega^2L^2}}; \quad \text{tg } \varphi = \frac{\omega L}{R}. \qquad (4.50)$$

Triunghiul din figura 4.23, *b* având laturile U_R, U_L și U se numește triunghiul tensiunilor.

Împărțind mărimile care constituie laturile acestui triunghi cu curentul I se obține un triunghi având laturile R, X_L și Z (fig. 4.23, *c*) care se numește triunghiul impedanțelor *.

2. PUTEREA ÎN CURENT ALTERNATIV MONOFAZAT

Cu aceste noțiuni preliminare se va trece la definirea mai multor feluri de puteri în curent alternativ.

● **Puterea activă** P reprezintă produsul dintre curentul I și componenta U_R a tensiunii U în fază cu curentul.

$$P = U_RI \qquad (4.51)$$

sau, deoarece $U_R = U \cos \varphi$ (fig. 4.23, *b*), relația (4.51) devine

$$P = UI \cos \varphi \qquad (4.52)$$

---

* Același lucru se poate obține din relația (4.49) scriind că $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$ sau $Z^2 = R^2 + X_L^2$ ceea ce dovedește că Z, R și X_L reprezintă laturile unui triunghi dreptunghic având ipotenuza egală cu Z.

Expresia (4.52) definește puterea activă în curent alternativ monofazat și ea se măsoară în W (watt).

Considerînd relațiile (4.47) și (4.51) se pot obține și alte expresii pentru puterea activă:

$$P = RI\,I = RI^2 = \frac{U_R^2}{R}\,. \tag{4.53}$$

Observație. Puterea activă mai poate fi definită și ca produsul dintre tensiunea U și componenta I_R a curentului I în fază cu tensiunea. Bineînțeles că $I_R = I\cos\varphi$ fapt care conduce la același rezultat:

$$P = UI_R = UI\cos\varphi.$$

Din motivele arătate mai sus U_R se numește *componenta activă a tensiunii* după cum I_R se numește *componenta activă a curentului.*

● **Puterea reactivă** Q reprezintă produsul dintre curentul I și componenta U_L a tensiunii U în cuadratură cu curentul:

$$Q = U_L I \tag{4.54}$$

sau, deoarece $U_L = U\sin\varphi$ (fig. 4.23, *b*) relația (4.54) devine:

$$Q = U\,I\sin\varphi \tag{4.55}$$

Aceasta reprezintă puterea reactivă în curent alternativ monofazat și ea se măsoară în var * (volt-amper-reactiv).

Similar, puterea reactivă mai poate fi exprimată și astfel:

$$Q = X_L I^2 = \frac{U_L^2}{X_L} \tag{4.56}$$

De asemenea puterea reactivă mai poate fi definită ca produsul dintre tensiunea U și componenta I_L a curentului I în cuadratură cu tensiunea. Componenta reactivă I_L a curentului ($I_L = I\sin\varphi$) conduce la același rezultat (relația 4.55).

Dacă circuitul este prevăzut și cu capacitate (R, L, C) reactanța are forma generală:

$$X = X_L - X_C \tag{4.57}$$

ceea ce înseamnă că expresia generală a puterii reactive este:

$$Q = (X_L - X_C)I^2 = X_L I^2 - X_C I^2. \tag{4.58}$$

Se poate vorbi deci despre:
— puterea reactivă inductivă $Q_L = X_L I^2$;
— puterea reactivă capacitivă $Q_C = X_C I^2$.

Observație. Ca și reactanțele, puterile reactive inductivă și capacitivă au întotdeauna semne contrarii, deci puterea reactivă totală reprezintă diferența celor două puteri.

---

* Menționăm că denumirea de VAR a fost adoptată de C.E.I. (Comitetul Electrotehnic Internațional) în anul 1930 pe baza propunerii unui savaut român — acad. prof. C. Budeanu (+ 1958).

● **Puterea aparentă** S reprezintă produsul dintre tensiunea U și curentul I

$$S = U \cdot I \tag{4.59}$$

similar, puterea aparentă mai poate fi exprimată și astfel:

$$S = ZI^2 = \frac{U^2}{Z}$$

și se măsoară în VA (volt-amper). Din relațiile (4.52), (4.55), și (4.59) se constată că

$$S^2 = P^2 + Q^2 \tag{4.60}$$

lucru care se observă și din figura 4.23, *d* numit triunghiul puterilor obținut din triunghiul tensiunilor prin înmulțirea valorilor fiecărei laturi cu curentul I.

3. PUTEREA ÎN SISTEMUL TRIFAZAT

Considerînd un sistem trifazat — generator sau consumator — avînd tensiunile pe fază E_1, E_2 și E_3 curenții I_1, I_2 și I_3 respectiv fazele φ_1, φ_2 și φ_3, puterile totale vor fi date de suma puterilor celor trei faze. Astfel:

● **Puterea activă:**

$$P = E_1 I_1 \cos \varphi_1 + E_2 I_2 \cos \varphi_2 + E_3 I_3 \cos \varphi_3 \tag{4.61}$$

În cazul unui sistem simetric ($E_1 = E_2 = E_3 = E$, $I_1 = I_2 = I_3 = I$ și $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi$) expresia puterii active este:

$$P = 3 \cdot E \cdot I \cos \varphi \tag{4.62}$$

și deoarece tensiunea între faze U este: $U = \sqrt{3}\, E$ se obține forma generală a puterii în sistemul trifazat

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cos \varphi \tag{4.63}$$

care este valabilă independent de modul de conectare — stea, în triunghi — al generatorului (putere produsă) sau al consumatorului (putere consumată).

● **Puterea reactivă:**

$$Q = E_1 I_2 \sin \varphi_1 + E_2 I_2 \sin \varphi_2 + E_3 I_3 \sin \varphi_3 \tag{4.64}$$

În cazul unui sistem simetric puterea reactivă este:

$$Q = 3\, EI \sin \varphi \tag{4.65}$$

sau, similar ca mai sus:

$$Q = \sqrt{3}\, UI \sin \varphi \tag{4.66}$$

● **Puterea aparentă:**

$$S = E_1 I_1 + E_2 I_2 + E_3 I_3 \tag{4.67}$$

În cazul unui sistem simetric puterea aparentă devine:

$$S = 3EI = \sqrt{3}\,UI \tag{4.68}$$

Observație. Și în cazul sistemului trifazat este valabilă relația $S^2 = P^2 + Q^2$.

4. ÎMBUNĂTĂȚIREA FACTORULUI DE PUTERE

Termenul $\cos\varphi$ din expresia puterii active (4.52) se numește *factor de putere*; el reprezintă un număr subunitar cu care trebuie înmulțită puterea aparentă S pentru a obține pe cea activă:

$$P = UI\cos\varphi = S\cos\varphi. \tag{4.68}$$

Deoarece, circulînd prin conductoare și cabluri către consumator curentul I produce pierderi de putere (RI^2) și căderi de tensiune (RI) însemnează că în industrie este necesar ca, pentru o anumită putere absorbită P și la o tensiune dată U să realizăm un curent absorbit minim, respectiv un factor de putere maxim ($\cos\varphi_{max} = 1 \Rightarrow \varphi = 0$).

De obicei, în industrie, datorită existenței motoarelor electrice (inductanțe), factorul de putere este subunitar ($\cos\varphi \simeq 0{,}5 \div 0{,}8$) unghiul φ fiind negativ (I în urma lui U).

Problema sporirii acestui factor la valori apropiate de 1 (de exemplu se impune $\cos\varphi > 0{,}92$) se numește *îmbunătățirea factorului de putere*. Îmbunătățirea factorului de putere se realizează în întreprinderi în special prin condensatoare statice care prin capacitatea lor „compensează" inductanțele motoarelor electrice (v. relația 4.58).

Aplicația 4.2. Un consumator industrial trifazat simetric alimentat la tensiunea $U = 6{,}3$ kV (fig. 4.24, *a*) absoarbe un curent $I_0 = 363$ A la un unghi de fază $\varphi_0 = -60^\circ$.

Se cere:

a) determinarea parametrilor schemei;

b) îmbunătățirea factorului de putere la valoarea $\cos\varphi_1 = 0{,}87$.

Răspuns.

a) Tensiunea pe fază a consumatorului:

$$E = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{6\,300}{\sqrt{3}} = 3\,630 \text{ V}.$$

Impedanța echivalentă pe fază:

$$Z_0 = \frac{E}{I_0} = \frac{3\,630}{363} = 10\ \Omega$$

Rezistența echivalentă pe fază:

$$R_0 = Z_0\cos\varphi_0 = 10 \cdot 0{,}5 = 5\ \Omega$$

Reactanța inductivă pe fază:

$$X_{L0} = Z_0\sin\varphi_0 = 10 \cdot 0{,}87 = 8{,}7\ \Omega$$

Diagrama fazorială este prezentată în figura 4.24, *b*.

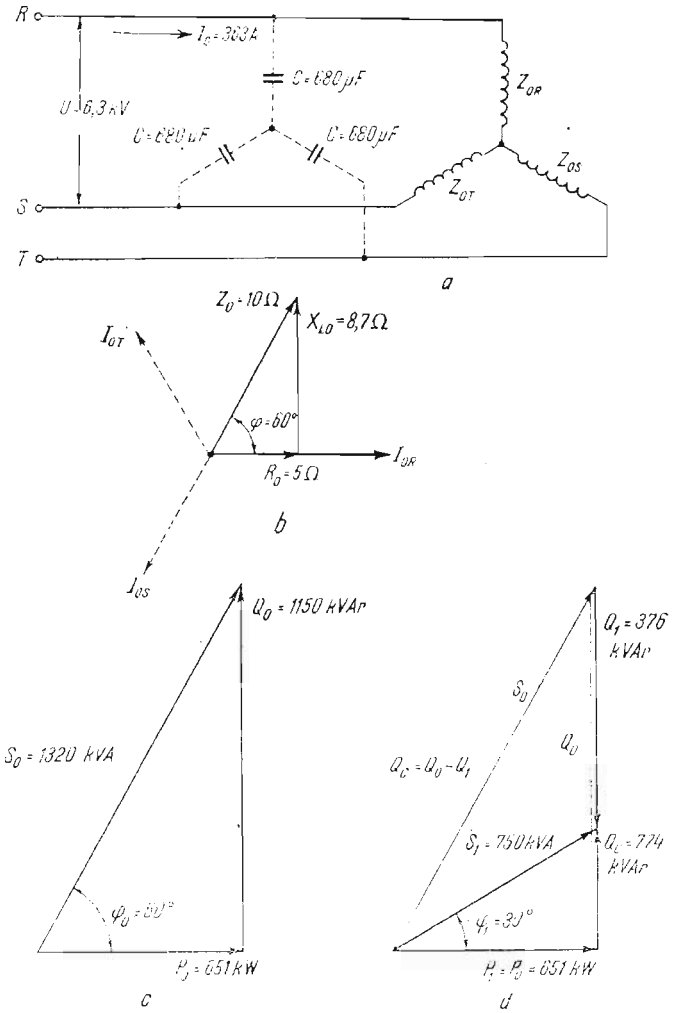


Fig. 4.24. Compensarea factorului de putere (aplicația 4.2):
a — schema electrică; *b* — triunghiul impedanțelor; *c* — triunghiul puterilor (fără compensare); *d* — triunghiul puterilor (cu compensare).

b) Pentru compensarea factorului de putere se vor calcula puterile P_0, Q_0 și S_0 înainte de compensare.

Puterea activă pe fază:

$$P_0 = EI_0 \cdot \cos \varphi_0 = 3\,630 \cdot 363 \cdot 0{,}5 = 651 \cdot 10^3 \text{W} = 651 \text{ kW}$$

Puterea reactivă pe fază (inductivă):

$$Q_0 = EI_0 \sin \varphi_0 = 3\,630 \cdot 363 \cdot 0{,}87 = 1\,150 \cdot 10^3 \text{ var} = 1\,150 \text{ kvar} = 1{,}15 \text{ Mvar.}$$

Puterea aparentă pe fază:

$$S_0 = EI_0 = 3\,630 \cdot 363 = 1\,320 \cdot 10^3 \text{ VA} = 1\,320 \text{ kVA} = 1{,}32 \text{ MVA}$$

Triunghiul puterilor este prezentat în figura 4.24, *c*.

În noile condiții — cu compensare — puterile adsorbite vor trebui să fie (cos $\varphi_1 = 0{,}78$ $\varphi_1 = 30°$):

puterea activă pe fază:

$$P_1 = P_0 = 651 \text{ kW};$$

puterea reactivă pe fază (inductivă):

$$Q_1 = P_1 \operatorname{tg} \varphi_1 = P_1 \operatorname{tg} 30° = 651 \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} = 376 \text{ kvar};$$

puterea reactivă compensată:

$$Q_C = Q_0 - Q_1 = 1\,150 - 376 = 774 \text{ kvar};$$

puterea aparentă pe fază scade de la 1 320 kVA la valoarea:

$$S_1 = \frac{P_1}{\cos \varphi_1} = \frac{651}{0{,}87} = 750 \text{ kVA};$$

curentul absorbit pe fază scade de la 363 A la valoarea:

$$I_1 = \frac{S_1}{E} = \frac{750 \cdot 10^3}{3\,630} = 206 \text{ A};$$

reactanța capacitivă pe fază:

$$X_C = \frac{E^2}{Q_C} = \frac{3\,630^2}{774 \cdot 10^3} = 4{,}7 \ \Omega;$$

capacitatea de compensare pe fază:

$$C = \frac{1}{\omega X_C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_C} = \frac{1}{314 \cdot 4{,}7} = 0{,}68 \cdot 10^{-3} \text{ F} = 680 \ \mu\text{F}.$$

Diagrama fazorială a puterilor în noile condiții va fi cea din figura 4.24, *d*.

REZUMAT

● Curentul electric alternativ se produce pe baza fenomenului de inducție cu ajutorul generatoarelor rotative.

● Mărimile caracteristice ale curentului alternativ sînt *valorile instantanee, maxime* și *eficace, perioada, frecvența, pulsația, faza* etc.

● Componentele pasive în circuitele de curent alternativ sînt rezistoarele, bobinele și condensatoarele (R, L și C) care se comportă diferit în ceea ce privește valoarea eficace și faza curentului absorbit.

● În industrie se folosește curentul alternativ trifazat.

● Calculul circuitelor de curent alternativ se efectuează pe baza legilor lui Ohm și Kirchhoff aplicate la curentul alternativ folosind calculul vectorial, adică mărimile alternative curenți, tensiuni, puteri etc. fiind reprezentate ca vectori (fazori).

● În curentul alternativ se folosesc în principal următoarele forme de puteri: *activă, reactivă* și *aparentă*.

● Îmbunătățirea factorului de putere (cos φ) conduce la reducerea curenților absorbiți de consumatori deci la micșorarea pierderilor în rețele.

VERIFICAREA CUNOȘTINȚELOR

1. Frecvența curentului alternativ reprezintă:
   a — turația generatorului?
   b — numărul de perioade pe secundă?
   c — pulsația înmulțită cu 2π?
2. Într-un circuit cu reactanță curentul în raport cu tensiunea este:
   a — în fază?
   b — în opoziție?
   c — în cuadratură?
3. Într-un circuit *R*, *C* suma algebrică a căderilor de tensiune în raport cu tensiunea aplicată este:
   a — egală?
   b — mai mare?
   c — mai mică?
4. Într-un circuit rezonant *R*, *L*, *C* serie căderea de tensiune pe capacitate în raport cu curentul total este:
   a — în fază?
   b — în opoziție?
   c — în cuadratură?
5. Într-un circuit *R*, *L*, *C* derivație puterea reactivă este determinată de:
   a — valoarea reactanței?
   b — valoarea impedanței?
   c — valoarea rezistenței?
6. Puterea aparentă absorbită de un circuit *R*, *L*, în raport cu suma algebrică a puterilor activă și reactivă este:
   a — mai mare?
   b — egală?
   c — mai mică?
7. Suma fazorială a căderilor de tensiune în raport cu tensiunea aplicată este:
   a — mai mare?
   b — egală?
   c — mai mică?

CAPITOLUL 5

PRODUCEREA, TRANSPORTUL, DISTRIBUȚIA ȘI UTILIZAREA ENERGIEI ELECTRICE

A. SISTEME ENERGETICE

Dezvoltarea economico-socială a unei societăți este astăzi de neconceput fără ajutorul energiei electrice, produse de centrale electrice.

Energia electrică este folosită în prezent pe scară din ce în ce mai largă în toate ramurile industriale, în transporturi, în agricultură, în domeniul casnic etc., dezvoltarea centralelor producătoare de energie electrică (industria energetică) devenind unul dintre cele mai importante obiective ale economiei naționale.

Forma de ansamblu în obținerea energiei electrice este sistemul energetic, constituit din: centrale electrice producătoare de energie, stații de transformare a curentului electric, linii de transport și distribuție a energiei (rețelele electrice) și receptoare care utilizează energia electrică (motoare, lămpi de iluminat etc.).

SISTEM ENERGETIC = CENTRALE + STAȚII + LINII + RECEPTOARE

Așadar, referindu-se la energia electrică, se observă că în instalațiile unui sistem energetic au loc în același timp următoarele procese distincte:

PRODUCEREA → CENTRALE
TRANSFORMAREA → STAȚII
TRANSPORTUL ȘI DISTRIBUȚIA → LINII (AERIENE ȘI CABLURI)
UTILIZAREA → RECEPTOARE (CONSUMATORI)

În figura 5.1 se prezintă ca exemplu schema de principiu a unui sistem energetic.

Atenție! Procesele din sistemul energetic arătate mai sus au loc practic în același timp, viteza de transport a energiei electrice fiind foarte mare *.

Dacă în trecut fiecare *oraș mare sau chiar fiecare* fabrică își avea cîte o centrală electrică proprie funcționînd în condiții neeconomice, cu randament redus, în prezent țara noastră deține un sistem energetic național cuprinzînd toate centralele, stațiile și consumatorii din țară, interconectate (legate) între ele prin linii electrice.

* Aceasta corespunde, de fapt, vitezei de propagare a cîmpului electromagnetic.

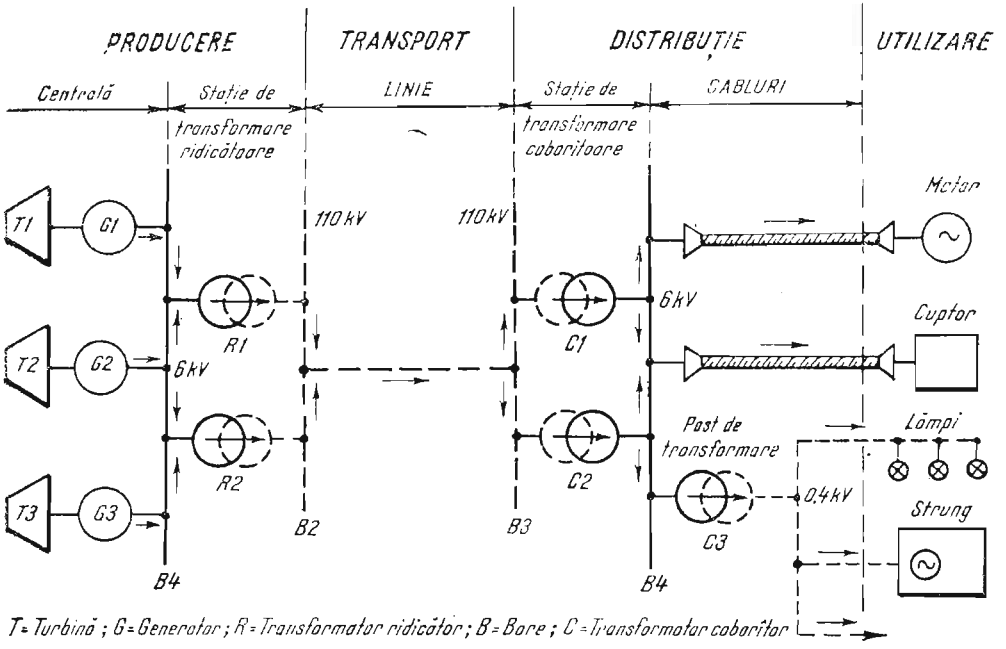


Fig. 5.1. Exemplu de sistem energetic.

Mai mult decît atît, sistemul nostru energetic este interconectat prin linii de foarte înaltă tensiune (220 kV și 400 kV, iar în viitor 750 kV) cu sistemele energetice naționale ale țărilor vecine (Bulgaria, Cehoslovacia, Iugoslavia, Ungaria, U.R.S.S.). Prin liniile de interconexiune internaționale se asigură în primul rînd o mai bună funcționare a fiecărui sistem energetic național în parte, iar în al doilea rînd se permit schimburi periodice de energie cînd, la un moment dat, unul dintre sisteme este *excedentar* (poate produce mai multă energie), iar altul este *deficitar* (are nevoie de energie).

B. CENTRALE ELECTRICE

1. NOȚIUNI GENERALE

Pentru producerea energiei electrice este necesară folosirea unor alte forme de energie, dintre care cele mai importante din punct de vedere practic * sînt energia calorică (căldura) — centrale termoelectrice — și energia apelor — centrale hidroelectrice.

* Pe scară mai redusă mai este utilizată energia vîntului — centrale eoliene — sau energia soarelui — baterii solare etc., care însă au utilizări speciale (de exemplu producerea prin baterii solare a energiei electrice pe rachete, pe sateliți artificiali, pe lună etc.) și care, deocamdată, nu sînt aplicate pe scară largă în sistemele energetice.

O centrală electrică oarecare are o anumită putere instalată, care reprezintă puterea totală a generatoarelor, exprimată în kilowați (kW) sau megawați (MW).

Un indicator sintetic, care exprimă gradul de dezvoltare la un moment dat al industriei energetice dintr-o țară precum și creșterea în timp (dinamica) a acestei industrii, este puterea totală instalată în centralele sistemului energetic național.

Notîndu-se cu P_t acest indicator care se exprimă în megawatt (MW) se poate scrie:

$$P_t[\mathrm{MW}] = \text{SUMA PUTERILOR TUTUROR CENTRALELOR}$$

În diagrama din figura 5.2 se prezintă modul în care a crescut acest indicator în țara noastră precum și perspectiva de dezvoltare în cincinalul actual.

Un alt indicator de asemenea important și care reflectă nu numai gradul de dezvoltare al puterii instalate în centrale, ci și modul de folosire intensivă a instalațiilor energetice este energia produsă anual pe cap de locuitor.

Notîndu-se cu E acest indicator, care se exprimă în kilowattore pe locuitor, se poate scrie:

$$E\left[\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{loc}}\right] = \frac{\text{SUMA ENERGIILOR PRODUSE ANUAL}}{\text{NUMĂRUL DE LOCUITORI AI ȚĂRII}}$$

În diagrama 5.3 se prezintă, ca și în cazul precedent, acest indicator.

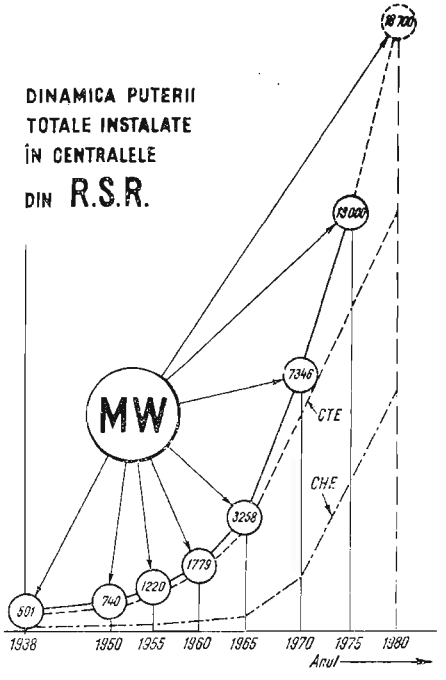


Fig. 5.2. Dinamica puterii instalate în R.S. România.

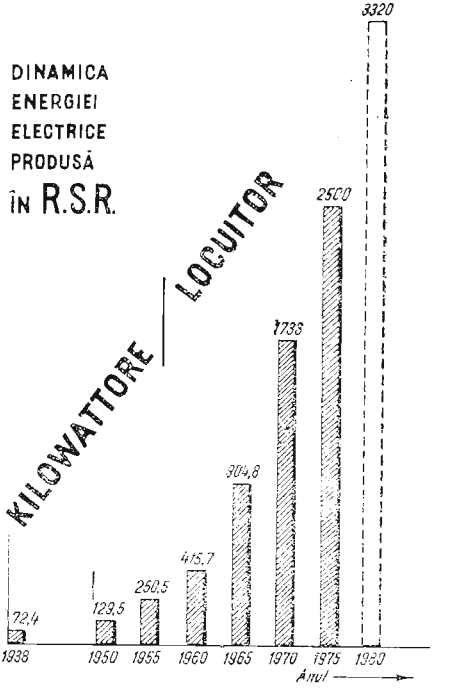


Fig. 5.3. Dinamica energiei produsă în R.S. România.

Observație. Indicatorii de mai sus determină gradul de dezvoltare a unei societăți; în cazul societății socialiste ei reflectă nivelul de trai al celor ce muncesc.

2. CENTRALE TERMOELECTRICE (CTE)

În funcție de natura energiei primare folosite, precum și de modul de transformare a acesteia în energie electrică, centralele termoelectrice se împart în:

— *centrale cu turbine de abur*;
— *centrale cu motoare Diesel*;
— *centrale cu turbine de gaze.*

a. Centrale cu turbine de abur

● **Centralele termoelectrice** (CTE). Schema unei centrale termoelectrice cu turbină de abur este arătată principial în figura 5.4. Se pot deosebi: *circuitul termic, circuitul electric, circuitul de răcire* și *circuitul de combustibil.*

Aburul produs într-un cazan la temperaturi și presiuni mari (maximum 600°C și 150 atm) se destinde într-o turbină, efectuînd un lucru mecanic care pune în mișcare rotorul turbinei. Din turbină aburul „uzat", la temperatură și presiune reduse ($t < 100$°C și $p < 1$ atm) este răcit într-un condensator unde, fiind transformat din nou în apă — *condensat* — este împins cu o pompă de circulație înapoi în cazan, constituind astfel un circuit închis — circuitul (ciclul) termic.

Turbina rotește generatorul producînd energie electrică ce este apoi transformată și trimisă în rețelele sistemului energetic — circuitul electric.

Condensatorul primește apa printr-o pompă, care o absoarbe de la un turn de răcire: apa astfel încălzită prin căldura preluată de la aburul uzat este trimisă înapoi turnului de răcire — circuitul de răcire.

Atenție! Aburul nu se amestecă cu apa de răcire, condensatorul fiind numai un schimbător de căldură, adică apa de răcire trece prin interiorul țevilor condensatorului, iar aburul — prin exteriorul lor.

Observație. În locul circuitului de răcire arătat în figura 5.4 care se mai numește și circuit de răcire *închis*, se poate utiliza un circuit de răcire *deschis*, folosind apa dintr-un riu sau lac, caz în care turnul de răcire nu mai este necesar.

Circuitul de combustibil. În ceea ce privește combustibilul, în figura 5.4, s-a considerat că se folosește cărbune (lignit, turbă etc.) adus la cazan dintr-un depozit cu ajutorul unei benzi rulante, reziduurile de ardere fiind evacuate sub formă de zgură și cenușă și sub formă de gaze arse printr-un coș de fum.

În țara noastră se folosește cărbunele la centralele: Doicești, Ovidiu, Paroșeni, Comănești etc., precum și la noile centrale de la Turceni și Rovinari-Rogojelu (Oltenia) avînd turbogeneratoare de cîte 330 MW de fabricație românească.

Drept combustibil se mai folosesc gazele naturale (de exemplu în centralele: Fîntînele-Sîngiorgiu, Luduș, Craiova, București Sud etc.) sau păcura (de exemplu în centralele: Borzești, Brazi etc.) sau chiar o combinație de combustibili (de exemplu centrala Grozăvești-București folosește după nevoie gaze naturale sau păcură).

● **Centrale electrice cu termoficare.** Uneori o centrală cu turbine de abur poate livra consumatorilor industriali sau casnici pe lîngă energia electrică, și abur de fabricație sau încălzire — termoficare — care este preluat prin prize

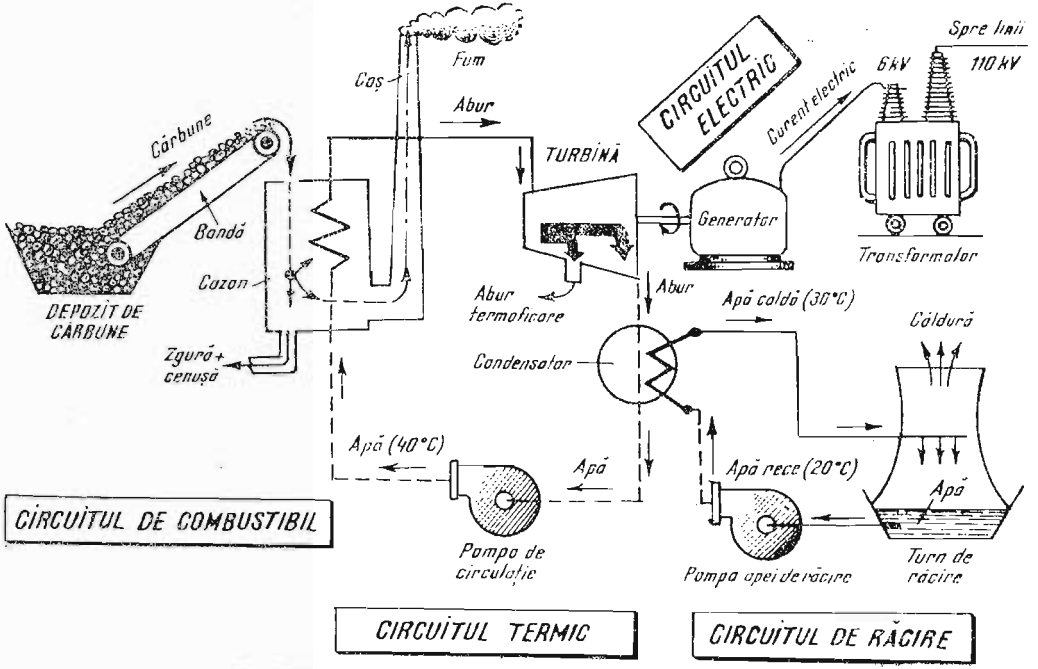


Fig. 5.4. Schema unei termocentrale cu turbină de abur.

de abur dintr-o anumită treaptă a turbinei (2—12 atm) (fig. 5.4). O asemenea centrală nu se mai numește centrală termoelectrică (CTE), ci centrală electrică cu termoficare (CET).

În țara noastră există: CET Borzești (alimentînd cu căldură Combinatul petrochimic), CET Craiova (Combinatul Işalnița), CET Brazi (Rafinăria Brazi, Întreprinderea 1 Mai etc.), CET Grozăvești, CET București Sud (orașul București), CET Pitești (Combinatul petrochimic etc.).

● **Centrale nuclearoelectrice.** Tot din categoria centralelor cu turbine de abur fac parte și centralele nuclearoelectrice. Schema de principiu a unei asemenea centrale este similară celei din figura 5.4 cu observația că în locul cazanului cu abur apare un reactor nuclear în care se produc reacții nucleare ce pot fi declanșate, reglate și întrerupte după necesități, și un schimbător de căldură care produce abur folosind energia termică primită de la reactor.

Reacțiile nucleare folosite în reactoarele centralelor nuclearoelectrice sînt reacții de dezintegrare în lanț, elementele care intră în compoziția combustibilului fiind uraniul și plutoniul.

b. Centrale cu motoare Diesel

Aceste centrale s-au folosit în special în trecut, datorită faptului că se instalează într-un timp scurt, în spații restrînse, iar pornirea grupului motor Diesel-generator se face foarte repede. Dezavantajele folosirii acestor centrale sînt următoarele: grupurile Diesel au putere redusă (maximum 6 ... 7 MW), uzura este rapidă deci sînt necesare revizii dese, randamentul este scăzut etc. Combustibilul folosit este motorina.

În prezent, grupurile Diesel electrice sînt folosite ca grupuri de intervenție rapidă sau pe instalații mobile (de exemplu locomotiva Diesel-electrică fabricată la Întreprinderea Electroputere din Craiova).

c. Centrale cu turbine de gaze

Ca și în cazul precedent, grupurile folosite sînt de asemenea de putere redusă. Combustibilul utilizat (gazele naturale) amestecat cu aerul comprimat este ars într-o cameră de ardere și este destins într-o turbină de gaze ca și în cazul celor de abur, gazul fiind evacuat în atmosferă.

În București, asemenea turbine cu gaze au funcționat la CTE Filaret și la CET București-Sud.

3. CENTRALE HIDROELECTRICE

Aceste centrale folosesc, prin amenajări speciale, diferența de nivel N între două puncte ale unui rîu sau fluviu ce străbate turbinele hidraulice, avînd debitul D.

Puterea mecanică datorită energiei potențiale și cinetice a apei se transformă în putere electrică. Puterea electrică P_e este dată de relația:

$$P_e = kDN \tag{5.1}$$

adică puterea depinde în egală măsură atît de debit, cît și de diferența de nivel (cădere).

Exemplul 1. Hidrocentrala Lotru folosește o cădere de nivel mare ($N_1 \approx \approx 500$ m) și obține o putere electrică destul de mare ($P_{e_1} = 525$ MW) deși debitul de apă (D_1) al Lotrului este relativ mic.

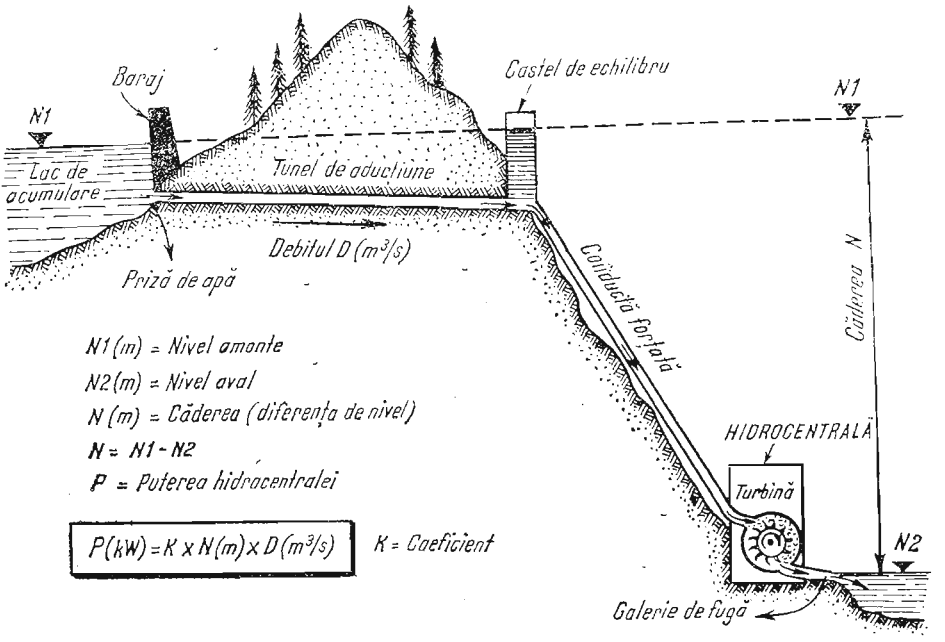


Fig. 5.5. Hidrocentrala de cădere mare (derivație).

Exemplul 2. Hidrocentrala de la Porțile de Fier folosește o cădere de nivel relativ mică ($N_2 \approx 25$ m); în schimb, obține o putere electrică foarte mare* ($P_{e_2} = 1\,050$ MW) datorită debitului mare de apă (D_2) al Dunării.

Primul exemplu reprezintă hidrocentralele *de cădere mare*, care se realizează în regiuni muntoase, amenajarea hidroenergetică avînd forma principială din figura 5.5: în locul în care valea unui rîu se îngustează între munți se amenajează un baraj care, reținînd apa, formează un *lac de acumulare*. Apa din lac trece printr-un *tunel de aducțiune* săpat în munte pe o lungime de cîțiva kilometri și ajungînd la *castelul de echilibru* (rezervor) este condusă prin *conducta forțată* (conducta de oțel cu pantă mare) către hidrocentrală.

Observație. Datorită pantei mari, în conducta forțată viteza apei crește, adică energia potențială a apei se transformă în energie cinetică.

Apa se destinde în turbina hidraulică producînd rotirea acesteia și este evacuată prin galeria de fugă.

Ca și în cazul termocentralelor, turbina antrenează generatorul, producînd energie electrică.

În țara noastră, din această categorie mai fac parte și hidrocentralele: Sadu, Dobrești, Moroeni, Bicaz, Argeș etc.

Al doilea exemplu reprezintă hidrocentrale *de debit mare*, care se construiesc în regiunile de șes. Hidrocentrala se realizează de obicei chiar în baraj (fig. 5.6).

În țara noastră, din această categorie mai fac parte și hidrocentralele: aval Bistrița (Pîngărați, Roznov, Bacău etc.); aval Argeș (Oiești, Cerbureni, Valea Iașului etc.) precum și hidrocentralele în construcție pe rîul Olt.

* mai mare decît dublul puterii totale care se găsea instalată în centralele din România la nivelul anului 1938 (501 MW).

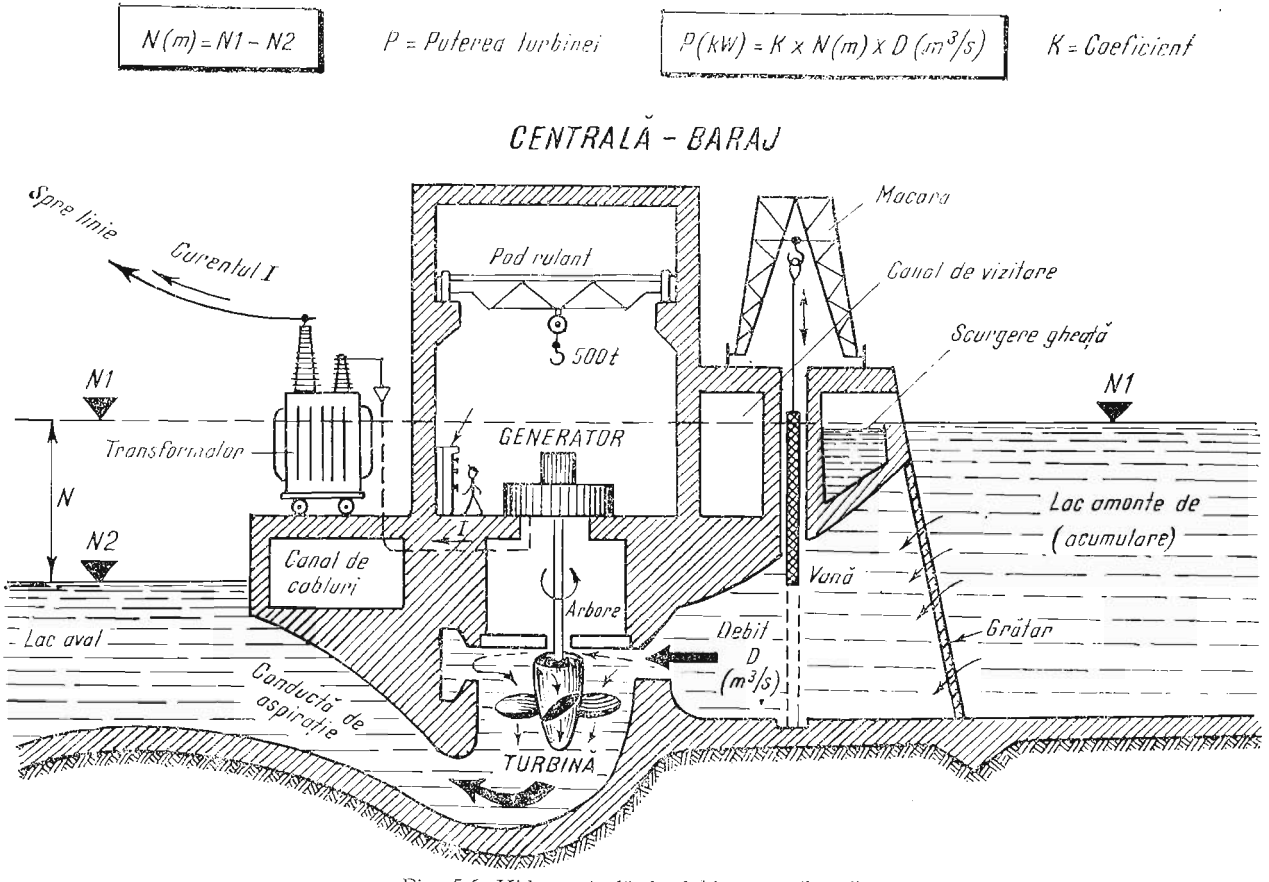


Fig. 5.6. Hidrocentrală de debit mare (baraj).

C. STAȚII DE TRANSFORMARE

Deoarcce grupurile generatoare produc energia electrică la tensiuni de 6 ... 20 kV, iar pentru a fi transportată la consumatori în condiții tehnico-economice bune sînt impuse tensiuni înalte (110 kV, 220 kV, 400 kV), apare necesară folosirea unor stații de transformare ridicătoare, avînd unul sau mai multe transformatoare ridicătoare de tensiune. Stația de transformare ridicătoare este amplasată lîngă centrala electrică și este condusă de obicei chiar de personalul de exploatare al centralei.

Exemplu. În figura 5.7, *a* se prezintă o schemă principială a unei centrale cuprinzînd patru grupuri generatoare de 12 MVA, 6 kV și stația de transformare 6/110 kV cuprinzînd două transformatoare 6/110 kV de 25 MVA.

Generatoarele de puteri mai mari de 25 MVA sînt legate direct cu transformatoarele ridicătoare formînd un *bloc generator-transformator*.

Exemplu. La UHE Lotru sînt trei generatoare de 175 MW care produc energie electrică la tensiunea de 22 kV și care fiecare debitează pe transformatoare ridicătoare (funcționînd „bloc") de 22/220 kV, 190 MVA (fig. 5.7, *b*).

Deoarece consumatorii de energie electrică (receptoarele) sînt alimentați de obicei la tensiuni relativ reduse: 6 ... 10 kV (motoare mari, cuptoare etc.), sau 0,4 kV ... 380/220 V (iluminat, motoare mici etc.) apar necesare stații de transformare coborîtoare alimentate de liniile de înaltă tensiune (110 kV, 220 kV etc.).

Stațiile de transformare se încadrează de obicei într-o rețea de distribuție a energiei dintr-o incintă industrială (întreprindere, combinat etc.).

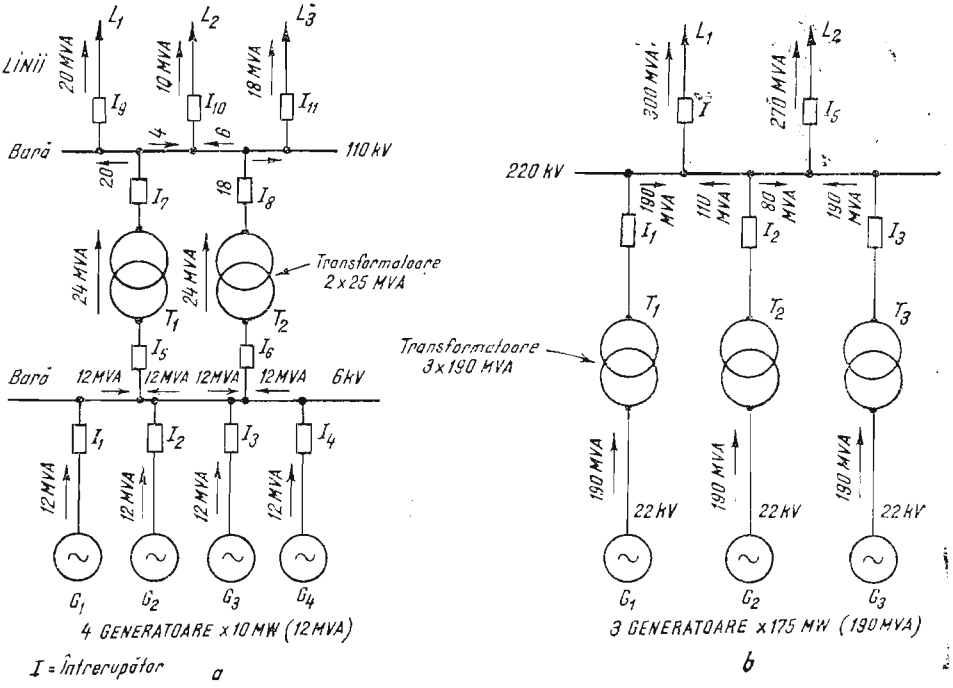


Fig. 5.7. Exemplu de transformare a energiei electrice în centrale:
a — stație de transformare ridicătoare; *b* — generatoare funcționînd în bloc cu transformatoarele.

Stațiile de transformare, ridicătoare sau coborîtoare, se realizează fie în aer liber (stații aeriene) — la tensiunile de 35 kV, 110 kV, 220 kV, 400 kV — aparatele de înaltă tensiune: întreruptoare, separatoare, transformatoare bare etc., fiind plasate pe fundații sau suporți din beton, fie în clădiri (stații interioare) — la tensiunile de 6 kV, 10 kV, 20 kV, 35 kV și chiar 110 kV.

Posturile de transformare de 6 ... 10/04, kV se realizează în cabine de zid sau tablă, în hale industriale, subteran — (în orașele mari) sau aeriene pe stîlpi (în mediul rural).

D. LINII ELECTRICE DE TRANSPORT ȘI DISTRIBUȚIE

Liniile electrice de transport constituie legăturile între diversele centrale și stații de transformare, asigurînd unitatea sistemului energetic național.

Tensiunile electrice folosite sînt 110 kV, 220 kV, 400 kV și în perspectivă, 750 kV. Aceste linii se construiesc pe stîlpi (suporți) din beton armat sau metalici (fig. 5.8).

Conductoarele pentru curent — conductoare active — sînt din funie de cupru sau oțel-aluminiu (inimă de oțel), iar în vîfrul stîlpului se află unul sau două conductoare de protecție din oțel sau oțel-aluminiu pentru a proteja conductoarele active împotriva loviturilor de trăsnet. Conductoarele active sînt suspendate pe lanțuri de izolatoare (fig. 5.9).

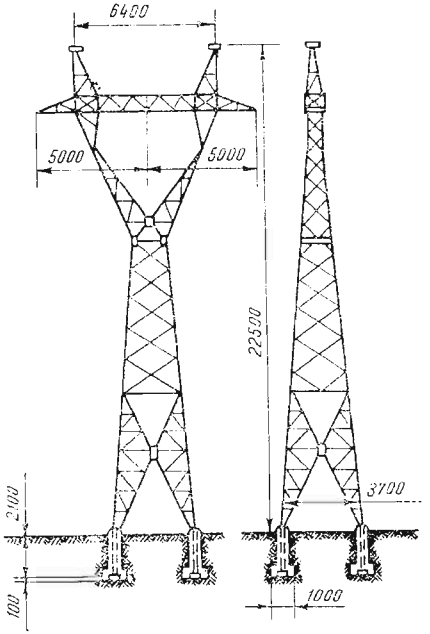


Fig. 5.8. Suport metalic cu zăbrele tip Y (pentru LEA 110 kV).

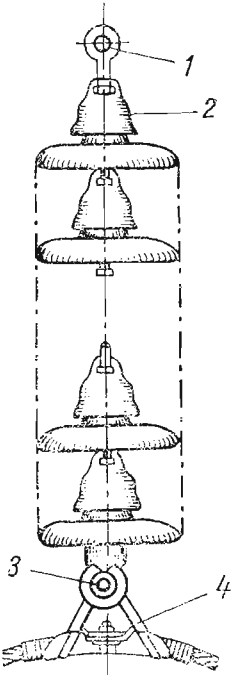


Fig. 5.9. Lanț de izolatoare de suspensie:

1, 3 — ochi de prindere; *2* — izolator; *4* — clemă.

Liniile de distribuție constituie legăturile între stațiile coborîtoare și barele consumatorilor. Ele se realizează pentru tensiunile de 35 kV, 20 kV, 15 kV (distribuții în mediul rural), 10 kV, 6 kV etc. (distribuție în mediul urban), fiind construite pe suporți de beton sau lemn cu conductoare de aluminiu sau oțel și izolatoare-suport.

În zonele populate sau în incintele industriale, liniile de distribuție se realizează sub formă de cabluri subterane, îngropate în pămînt sau în canale speciale.

E. UTILIZAREA ENERGIEI ELECTRICE

1. INTRODUCERE

După cum s-a arătat energia electrică își găsește o largă aplicare în toate domeniile vieții sociale. Consumatorii de energie electrică se împart în două categorii mari: *casnici* și *industriali*.

● **Consumatorii casnici** absorb în principal energie electrică pentru iluminat și în subsidiar pentru alte utilizări casnice cum sînt: aspirator, fier de călcat, reșou, mașină de spălat, ventilator etc.

● **Consumatorii industriali** cuprind, în afara iluminatului care reprezintă un consum relativ redus, o serie de utilizări cu specific electric cum sînt: sudarea, încălzirea, tracțiunea, acționarea utilajelor etc.

2. SUDAREA ELECTRICĂ

Se poate realiza în două moduri: *cu arc electric* sau *cu rezistență de contact*.

● **Sudarea electrică prin arc.** În acest caz (fig. 5.10) sursa electrică S asigură producerea unui arc electric A care se formează între peisele de sudat P și electrodul E care se topește treptat.

● **Sudarea prin rezistență de contact** (fig. 5.11) a două piese P poate fi realizată în următoarele moduri:

— *sudarea cap la cap* (fig. 5.11, *a*). Piesele P_1 și P_2 alimentate prin electrozii E_1 și E_2 de la sursa S sînt presate reciproc astfel că curentul I trecînd prin contactul C produce încălzirea locală, topirea materialului și deci sudarea pieselor;

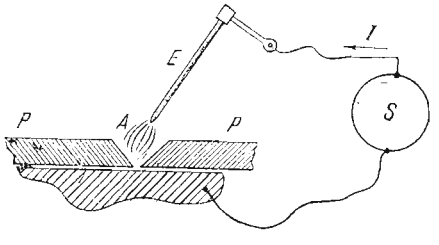


Fig. 5.10. Sudarea electrică prin arc.

— *sudarea prin puncte* (fig. 5.11, *b*). Electrozii ascuțiți E_1 și E_2 fixați într-un clește K apasă cele două table metalice P_1 și P_2 producînd sudarea în punctul C de trecere a curentului electric I;

— *sudarea prin cusătură* (fig. 5.11, *c*). Este practic similară cu cea precedentă cu observația că electrozii E_1 și E_2 avînd forma unor role se deplasează de-a lungul unei linii.

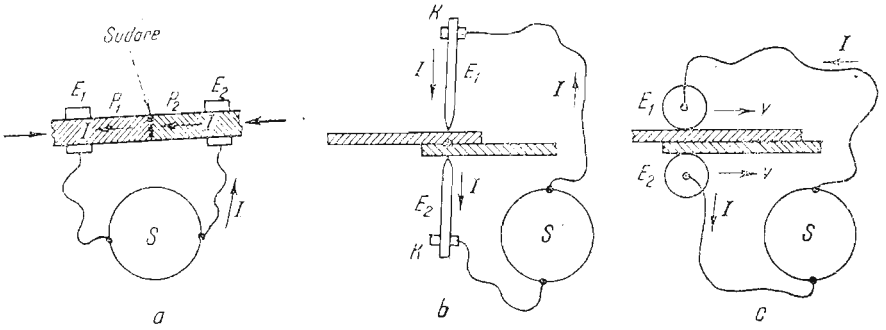


Fig. 5.11. Sudarea electrică prin rezistență de contact:
a — cap la cap; *b* — prin puncte; *c* — prin cusătură.

3. ÎNCĂLZIREA ELECTRICĂ

● **Cuptoarele electrice** au o utilizare largă în industrie pentru topirea metalelor și diverse tratamente termice. Se disting următoarele tipuri de cuptoare electrice;

— *cu arc* (fig. 5.12, *a*) la care arcul electric A produs în aer între doi electrozi E_1 și E_2 asigură încălzirea masei de topit M;

— *cu rezistență* (fig. 5.12, *b*) la care electrodul E pătrunde în masa materialului de topit M căldura fiind produsă prin efect Joule-Lenz în rezistența proprie a materialului respectiv;

— *de inducție* (fig. 5.12, *c*) la care materialul de încălzit M plasat într-un jgheab circular C constituie înfășurarea secundară a unui transformator T (v. cap. 6).

● **Lămpi cu radiații infraroșii.** Sînt similare cu cele folosite la iluminat avînd însă radiații în domeniul infraroșu ($\lambda > 0{,}76\ \mu$).

În practică se realizează panouri formate din mai multe lămpi avînd puteri unitare de 300—1 000 W și care au diverse utilizări ca de exemplu: asigură temperaturi de uscare a suprafețelor vopsite, a materialelor textile — fire și țesături — la conservarea unor produse agricole ca: legume, fructe, cereale, furaje, semințe etc. precum și în industria lemnului și hîrtiei, a pielăriei etc.

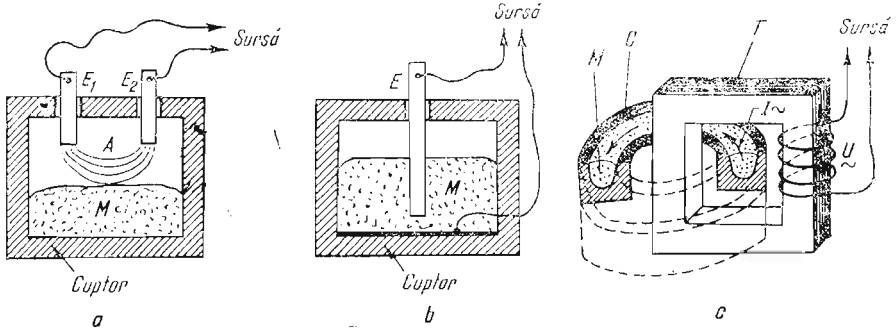


Fig. 5.12. Cuptoare electrice:
a — cu arc; *b* — cu rezistență; *c* — de inducție.

4. TRACȚIUNEA ELECTRICĂ

Reprezintă o formă destul de veche (și care și astăzi este în plină dezvoltare) de folosire a energiei electrice în scopul acționării tramvaielor, troleibuzelor și trenurilor. Motoarele electrice ale vehiculelor respective sînt de obicei motoare de curent continuu cu excitația serie (v. cap. 6). Alimentarea cu energie electrică se face de obicei de la o linie aeriană — linie de contact — prin intermediul unui dispozitiv special — troleu sau pantograf.

Tensiunea folosită la tramvaie, troleibuze, metrouri și locomotive electrice de mină este de 750—800 V c.c.

La acționarea trenurilor se folosesc de obicei următoarele sisteme de tracțiune electrică:

- sistemul de curent continuu la 1 500—3 000 V cu motoare serie de curent continuu;
- sistemul de curent alternativ trifazat de frecvență redusă (16 2/3 Hz) cu o tensiune monofazată de 15 kV, 50 Hz la linia de contact și convertizor de frecvență (50 Hz → 16 2/3 Hz) pe locomotivă care transformă curentul din monofazat în trifazat, motoarele fiind trifazate;

Observație. Se constată că $3 \times 16\ 2/3\ \text{Hz} = 50\ \text{Hz}$.

- sistemul de curent alternativ monofazat de 50 Hz cu o tensiune de 25 kV la linia de contact. La acest sistem care a fost adoptat și în țara noastră, se folosesc locomotive prevăzute cu motoare de curent continuu alimentate prin transformatoare și redresoare cu siliciu (v. cap. 11).

În țara noastră se construiesc pe lîngă tramvaie, troleibuze, locomotive de mină etc. și mai multe tipuri de locomotive electrice pentru calea ferată avînd puteri de 2 000 ÷ 5 000 kW (Întreprinderea Electroputere — Craiova).

5. ALTE UTILIZĂRI ALE ENERGIEI ELECTRICE

Dintre multe alte forme de utilizare a energiei electrice se mai menționează următoarele:

— *la elaborarea (extragerea) unor metale folosind compușii acestora,* ca, de exemplu obținerea aluminiului prin electroliza oxidului de aluminiu procedeu folosit la Combinatul de aluminiu Slatina;

— *la rafinarea metalelor* adică la obținerea lor în stare chimic pură. Acest procedeu se aplică de exemplu la realizarea cuprului, argintului, aurului, nichelului etc.;

— *la acoperirea electrolitică cu metale.* Prin acest procedeu numit *galvanostegie* se acoperă metalele obișnuite — de obicei oțelul — care sînt supuse oxidării cu metale rezistente la agenți corosivi, ca de exemplu: nichel, crom, cadmiu, zinc, argint etc.;

— *la obținerea pe scară industrială a unor elemente sau compuși chimici* ca: hidrogenul, oxigenul, clorul, manganul, hidroxidul de sodiu etc.

REZUMAT

Un sistem energetic cuprinde următoarele unități de bază:
— centrale;
— stații de transformare ridicătoare;
— linii de transport;
— stații de transformare coborîtoare;
— receptoare de energie.

- Producerea energiei electrice este asigurată în principal în:
  - centrale termoelectrice;
  - centrale hidroelectrice.
- O centrală termoelectrică cuprinde:
  - circuitul termic (de abur);
  - circuitul electric;
  - circuitul de răcire;
  - circuitul de combustibil.
- O amenajare hidroelectrică de cădere mare cuprinde:
  - lacul de acumulare;
  - barajul;
  - tunelul de aducțiune;
  - castelul de echilibru;
  - conducta forțată;
  - centrala propriu zisă (turbină, generator etc.);
  - galeria de fugă.
- Stațiile de transformare sînt de două feluri:
  - ridicătoare de tensiune (la centrale);
  - coborîtoare de tensiune (la consumatori).
- Liniile de energie se împart în:
  - linii de transport (110 kV, 220 kV, 400 kV, 750 kV), care sînt de obicei aeriene;
  - linii de distribuție (35 kV, 20 kV, 15 kV, 10 kV, 6 kV, 0,4 kV), care pot fi aeriene sau în cablu.
- Energia electrică este folosită în special în industrie cuprinzînd, practic, toate domeniile ca: chimie, metalurgie, transporturi, construcții de mașini etc.

VERIFICAREA CUNOȘTINȚELOR

1. Energia produsă anual pe cap de locuitor este un indice sintetic care oglindește:
   a — mărimea grupurilor generatoare instalate în centralele electrice?
   b — stadiul de dezvoltare tehnico-economică al societății?
   c — puterea sistemului energetic?
2. Centralele electrice de termoficare (CET) asigură:
   a — producerea combinată de energie electrică și termică?
   b — producerea energiei electrice folosind energie termică?
   c — producerea aburului tehnologic folosind instalații electrice?
3. Puterea unei hidrocentrale depinde de:
   a — nivelul apei din lac față de nivelul mării?
   b — volumul total al apei din lacul de acumulare?
   c — produsul dintre diferența de nivel a apei la turbine și debitul de apă ce străbate turbinele?
4. Stațiile de transformare sînt necesare:
   a — pentru ridicarea și reducerea tensiunii la centrale, respectiv la consumatori?
   b — pentru mărirea puterii produse în centrale?
   c — pentru folosirea unor tensiuni standardizate?

CAPITOLUL 6

MAȘINI ELECTRICE ȘI ACȚIONĂRI

A. NOȚIUNI GENERALE

1. MAȘINI ELECTRICE

a. Generalități

Mașinile electrice sînt părți componente ale sistemelor energetice avînd rolul de a transforma;

— energia mecanică în energie electrică (generatoare);

— energia electrică în energie mecanică (motoare);

— energia electrică avînd anumiți parametri, în energie electrică avînd alți parametri. Astfel de mașini electrice sînt:

● **Transformatoarele** — energia electrică de la o anumită tensiune (curent) se transformă la o altă tensiune (curent).

● **Convertoarele** — energia electrică de la o anumită frecvență se transformă la o altă frecvență.

● **Redresoarele** — energia electrică de curent alternativ se transformă în energie electrică de curent continuu.

● **Ondulatoarele** (invertoare) — energia electrică de curent continuu se transformă în energie electrică de curent alternativ.

În concluzie, o mașină electrică permite convertirea energiilor de la o formă la altă formă dintre care cel puțin una este energie electrică.

b. Clasificare

● **După modul în care are loc transformarea** se deosebesc următoarele tipuri de mașini electrice:

— *statice* — care nu conțin piese în mișcare ca de exemplu transformatoarele, redresoarele etc.;

— *rotative* — care conțin piese în mișcare („se rotesc") ca de exemplu generatoarele, motoarele etc.

● **După felul curentului folosit** mașinile electrice pot fi: *de curent continuu* sau *de curent alternativ* (monofazat sau trifazat).

În cele ce urmează vor fi prezentate cele mai răspîndite tipuri de mașini electrice și anume: transformatoarele, mașinile rotative de curent continuu, precum și cele de curent alternativ trifazat.

În scopul realizării proceselor tehnologice o serie de elemente ca de exemplu: pompe, ventilatoare, mașini-unelte, compresoare etc. trebuie să fie acționate, adică să primească lucru mecanic de la o anumită sursă de energie. În funcție de natura sursei de energie se deosebesc următoarele feluri de acționări:

— *electrice* — care folosesc energia electrică de curent continuu sau alternativ;

— *pneumatice* — care folosesc energia unui gaz sub presiune (de obicei aer comprimat);

— *hidraulice* — care folosesc energia unui lichid sub presiune (de obicei ulei sub presiune).

Acționările electrice sînt cele mai răspîndite în timp ce cele pneumatice și hidraulice sînt folosite în cazuri speciale; de exemplu acționările pneumatice se folosesc în medii cu pericol de explozie sau incendiu, iar acționările hidraulice, atunci cînd se dorește obținerea unor forțe (presiuni) mari ca de pildă la presele hidraulice.

Schema structurală a unei acționări electrice (fig. 6.1) cuprinde o sarcină S (ventilator, strung, pompă etc.) capabilă să producă un lucru mecanic util și care primește energia mecanică (de mișcare) de la un motor electric M alimentat cu energie electrică. În scopul îndeplinirii unui anumit program de acționare * motorul primește o anumită comandă care poate fi efectuată manual (de către un operator uman) sau automat, în ambele cazuri prin intermediul unor aparate electrice adecvate (chei de comandă, reostate, relee etc.).

Aceste comenzi se referă la procesele de pornire, oprire (frînare), variere a vitezei, inversare a sensului de rotire a motorului etc.

La stabilirea regimului de mișcare al sistemului de acționare intervin trei cupluri mecanice: *motor*, *static* și *dinamic*.

● **Cuplul motor** (C_M) sau de mișcare este un moment activ deoarece produce mișcarea ansamblului; el este caracteristic fiecărui tip de motor (asincron, sincron etc.) iar pentru același motor este dependent de variația diverșilor parametri.

● **Cuplul static** (C_S) sau de sarcină este un moment rezistent opus momentului motor fiind specific fiecărui tip de sarcină și cuprinde atît momentul necesar lucrului util cît și momentul de frecare mecanică (frecare în lagăre, frecare cu aerul etc.). Cuplul static poate fi independent de viteză sau poate să se modifice în funcție de valoarea vitezei.

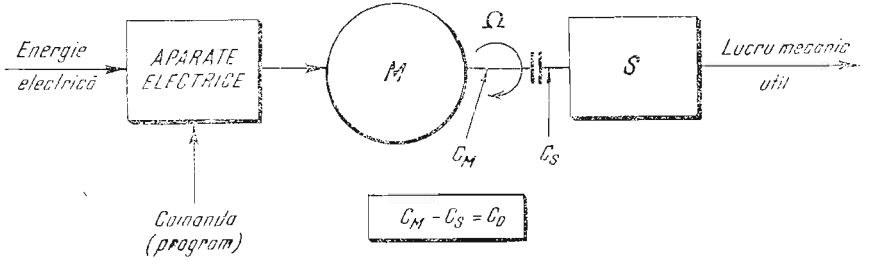


Fig. 6.1. Schema structurală a unei acționări electrice.

* De exemplu: pornire-frînare, înainte-înapoi, mai repede-mai încet etc.

● **Cuplul dinamic** (C_D) de inerție sau accelerator este un moment de asemenea rezistent prin care masele în mișcare se opun variațiilor de viteză.

Observație. La viteză constantă cuplul dinamic este nul, în regim de creștere a vitezei cuplul dinamic este negativ adică se opune cuplului motor (tinde să frîneze mișcarea) iar în regim de scădere a vitezei cuplul dinamic este pozitiv ($+C_D$) adică se adună cu cuplul motor.

Ecuația fundamentală a mișcării la o acționare este:

$$C_M - C_S \pm C_D = 0, \tag{6.1}$$

$$C_M = C_S \mp C_D. \tag{6.2}$$

Așadar, suma algebrică a valorilor instantanee pentru cuplurile care acționează asupra unui sistem în mișcare (de exemplu un sistem de acționare electrică) este nulă.

Atenție! Semnul momentului $\mp C_D$ se alege conform observației de mai sus.

Pe baza ecuației fundamentale a mișcării se alege motorul adecvat unei sarcini date, timpul de pornire-oprire a ansamblului etc.

În cele ce urmează, paralel cu descrierea diverselor tipuri de motoare, se vor prezenta și unele scheme de acționare folosind motoarele respective.

B. TRANSFORMATOARE ELECTRICE

1. PRINCIPIUL DE FUNCȚIONARE

Transformatorul electric este o mașină electrică statică (fără piese în mișcare) pentru curent alternativ, care transformă energia electrică avînd anumite valori ale tensiunii (curentului) tot în energie electrică la alte valori ale parametrilor respectivi.

De exemplu, se transformă tensiunea de la 110 kV la 6 kV sau curentul de la 1 000 A la 5 A etc.

Elementele minimale ale unui transformator monofazat sînt (fig. 6.2):
— *miezul magnetic*, care servește ca circuit pentru fluxul magnetic;
— *o înfășurare primară* (bobină), conectată la sursa de alimentare;
— *o înfășurare secundară* (bobină), prin care se alimentează consumatorul;
— *elemente auxiliare*, ca: borne, izolatoare, cuvă etc.

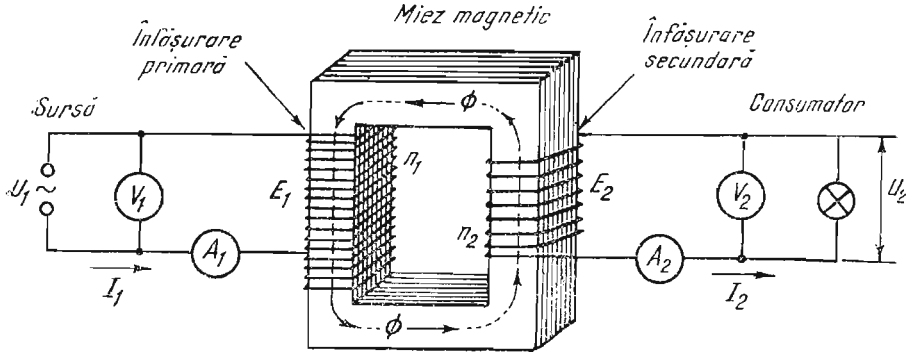


Fig. 6.2. Transformator monofazat.

Funcționarea transformatorului se bazează pe legea inducției electromagnetice dintre două (sau mai multe) bobine parcurse de același flux magnetic.

Aplicîndu-se o tensiune primară U_1 și presupunîndu-se deocamdată, că transformatorul funcționează în gol (fig. 6.3, *a*) adică în secundar consumatorul nu este conectat, el va absorbi un curent primar I_1. Acest curent, numit *de magnetizare*, străbătînd cele n_1 spire ale înfășurării primare dă naștere unui cîmp magnetic, deci unui flux magnetic Φ.

Fluxul alternativ Φ de frecvență f va induce în cele două înfășurări (primară — n_1 spire și secundară — n_2 spire) cîte o tensiune electromotoare (E_1, respectiv E_2):

$$E_1 = 4{,}44\ n_1 f\Phi \quad [\text{V}]; \tag{6.3}$$

$$E_2 = 4{,}44\ n_2 f\Phi \quad [\text{V}]. \tag{6.4}$$

S-a obținut astfel un transformator monofazat, al cărui raport de transformare K_T este dat de expresia:

$$K_T = \frac{E_2}{E_1} = \frac{n_2}{n_1}. \tag{6.5}$$

Întrucît la funcționarea în gol curentul I_1 este foarte mic ($I_1 = I_{10}$ — curent de gol), se poate considera:

$$E_1 \cong U_1, \tag{6.6}$$

iar

$$E_2 = U_2, \tag{6.7}$$

de unde rezultă:

$$K_T = \frac{E_2}{E_1} \cong \frac{U_2}{U_1}. \tag{6.8}$$

Raportul de transformare al unui transformator este egal cu raportul numărului de spire ale bobinei secundare și primare și este egal și cu raportul tensiunii secundare și primare la mersul în gol.

Închizînd înfășurarea secundară pe un consumator (impedanța de sarcină Z_S) va lua naștere un curent secundar I_2 și transformatorul funcționează în sarcină (fig. 6.3, *b*).

Conform legii conservării energiei, neglijîndu-se pierderile în transformator se poate scrie:

$$E_1 I_1 \cong E_2 I_2$$

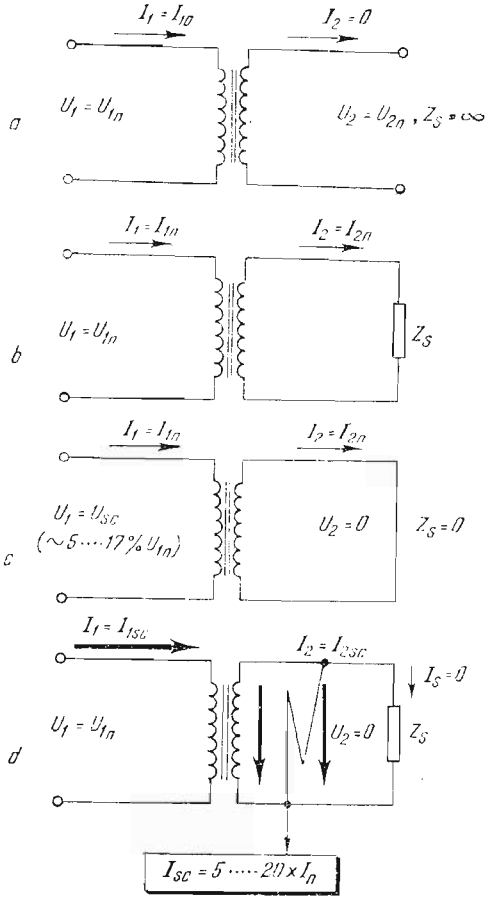


Fig. 6.3. Regimuri de funcționare a transformatoarelor:
a — în gol; *b* — în sarcină; *c* — în scurtcircuit; *d* — avarie.

sau

$$\frac{E_2}{E_1} \cong \frac{I_1}{I_2},$$

de unde rezultă

$$K_T = \frac{E_2}{E_1} \cong \frac{I_1}{I_2}.$$

Raportul de transformare este egal și cu raportul dintre curentul primar și cel secundar la funcționarea în sarcină.

În studiul transformatorului interesează regimul de funcționare în scurtcircuit (fig. 6.3, *c*). În acest caz transformatorul are secundarul legat în scurtcircuit ($Z_s = 0$) însă tensiunea U_{sc} aplicată este mai mică decît cea nominală ($U_{sc} = 5 \ldots 17\% U_n$) și este astfel aleasă încît prin transformator să circule curenții nominali. Tensiunea U_{sc} se numește tensiunea de scurtcircuit a transformatorului și ea se exprimă de obicei în procente (X_{sc}) din tensiunea nominală.

$$X_{sc} = \frac{U_{sc}}{U_n} \times 100 \ (\%)$$

Tensiunile procentuale * de scurtcircuit sînt de obicei:

$X_{sc} = 5 \ldots 8\%$ la transformatoarele de puteri mici (100 ... 1000 MVA) și tensiuni nominale de 0,4 kV ... 6,3 kV;

$X_{sc} = 10{,}5 \ldots 17\%$ la transformatoare de puteri și tensiuni mai mari.

Atenție! Nu trebuie să se confunde regimul de funcționare în scurtcircuit al transformatorului care reprezintă o încercare de platformă (laborator) conform condițiilor arătate mai sus cu scurtcircuitul într-un transformator care are loc pentru tensiunea nominală (fig. 6.3, *d*) și care reprezintă o avarie (defect). Curentul prin transformator crește în acest caz de la 6 ... 20 ori față de cel nominal.

Observație. Regimul de funcționare în sarcină se situează între două regimuri limită de funcționare:

— regimul de gol ($Z_s = \infty$);

— regimul de scurtcircuit ($Z_s = 0$).

2. CARACTERISTICI

Mărimile caracteristice principale ale unui transformator sînt: puterea nominală, tensiunile nominale, curenții nominali, pierderile nominale, randamentul, tensiunea de scurtcircuit etc.

● **Puterea nominală** (S_n) este valoarea puterii electrice (exprimată în VA, kVA sau MVA) transferată consumatorului în condițiile în care nu sînt depășite limitele admisibile de încălzire a bobinajelor.

Puterile standardizate pentru transformatoare** sînt: 100, 160, 250, 400, 630, 1 000 kVA (1 MVA), 1,6; 2,5; 4; 6,3; 10; 16; 25; 40; 63; 100 MVA.

---

* Sînt denumite în mod curent și reactanțe de scurtcircuit, motiv pentru care se notează cu simbolul X.

** La transformatoarele de puteri mai mici, valorile acestora nu sînt standardizate.

● **Tensiunile nominale** primară și secundară (U_{n_1} și U_{n_2}) sînt valorile de tensiune destinate constructiv pentru a fi aplicate în primar, respectiv pentru a fi obținute în secundar.

Tensiunile standardizate uzual sînt: 0,4; 1; (5); 6,3; 10,5; 15,75; 20; 35; 110; 220; 400; 750 kV.

● **Curenții nominali** (I_{n_1} și I_{n_2}) sînt valorile de curenți corespunzătoare puterii nominale și tensiunilor nominale primară și secundară

$$I_{n_1} = \frac{S_n}{U_{n_1}}; \quad I_{n_2} = \frac{S_n}{U_{n_2}}.$$

● **Pierderile nominale** de putere ΔP(W) reprezintă valoarea puterilor pierdute în transformator.

Sînt constituite din:

— *pierderi în fier* datorite curenților induși în miezul de fier (curenți turbionari), precum și fenomenului de histerezis (ΔP_F);

— *pierderi în conductoare* (cupru sau aluminiu) prin efectul Joule-Lenz (ΔP_C):

$$\Delta P_C = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 \tag{6.9}$$

în care: R_1 și R_2 sînt rezistențele ohmice ale înfășurărilor.

Rezultă:

$$\Delta P = \Delta P_F + \Delta P_C. \tag{6.10}$$

● **Randamentul** transformatorului (η) reprezintă raportul dintre puterea P_2 transmisă în secundar și puterea P_1 absorbită de la sursă:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} < 1. \tag{6.11}$$

În figura 6.4 se prezintă mărimile nominale și diagrama transferului de putere printr-un transformator.

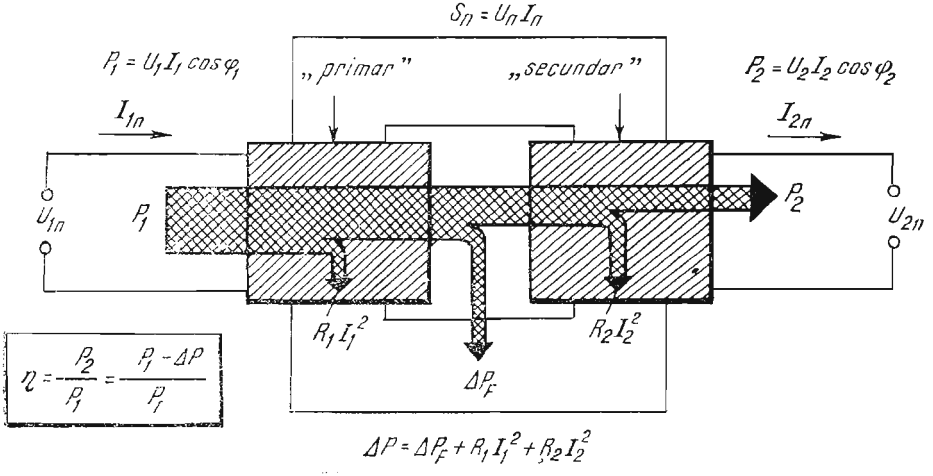


Fig. 6.4. Mărimile nominale și diagrama de transfer a puterii prin transformator.

La aceste caracteristici principale se mai adaugă și altele cum ar fi: raportul de transformare, tensiunea de scurtcircuit etc. care au fost definite în paragraful precedent.

3. TIPURI DE TRANSFORMATOARE

Clasificarea transformatoarelor se poate face pe baza mai multor criterii.

● **După sistemul de curent folosit** se deosebesc:

— *transformatoare monofazate*;
— *transformatoare polifazate* * (de obicei trifazate).

● **După scopul de utilizare** se construiesc:

— *transformatoare de putere* (forță), folosite în instalațiile energetice pentru producerea și distribuția energiei electrice;
— *transformatoare de măsură* (de curent și tensiune — v. cap 8);
— *transformatoare speciale*, cum sînt cele pentru sudură, pentru cuptoare electrice, pentru redresoare, pentru radio etc.

● **După sensul de transfer al energiei** există:

— *transformatoare ridicătoare de tensiune*, folosite în centralele electrice (v. cap. 5);
— *transformatoare coborîtoare de tensiune*, folosite în stațiile de distribuție (v. cap. 5).

● **După mediul în care sînt plasate înfășurările** se construiesc:

— *transformatoare uscate* (în aer sau rășini sintetice);
— *transformatoare cu ulei* **.

Definirea unui transformator se face pe baza tuturor criteriilor de mai sus, inclusiv prin indicarea caracteristicilor principale. De exemplu: transformator trifazat, de putere, în ulei, ridicător 6,3/110 kV, 10 MVA.

4. TRANSFORMATOARE TRIFAZATE

Aceste tipuri de transformatoare sînt cele mai răspîndite, fiind folosite în mod obișnuit pentru puteri ce depășesc 2 kVA.

Se poate obține un transformator trifazat legînd într-una din conexiunile cunoscute (stea sau triunghi) trei transformatoare monofazate. Asemenea soluții se aplică în sistemele energetice la tensiuni foarte mari (220 ... 750 kV) și puteri de asemenea mari (peste 400 000 kVA — 400 MVA).

● **Elemente constructive.** Un transformator trifazat — văzut în secțiune — este prezentat în figura 6,5, *a*.

---

* Pentru scopuri speciale se pot construi transformatoare: bifazate (două faze), hexafazate (șase faze) etc.

** Uleiul are un dublu rol: acela de izolare — dielectric — (v. cap. 1) precum și cel de răcire.

Peste miezul magnetic cu trei coloane *1* (arătat detaliat în figura 6.5, *b*) se află bobinajul de joasă tensiune *2*, iar deasupra este plasat bobinajul de înaltă tensiune *3*. Traversa de rigidizare *4* și tiranții *5* asigură fixarea miezului pe capacul *6* al cuvei *7*. Capetele înfășurărilor sînt legate la izolatoarele de înaltă tensiune *8* prin barele conductoare *10* și la izolatoarele de joasă tensiune *9* prin conductoare trase în tuburile izolante *11*. Talpa *12* a transformatorului este fixată pe căruciorul *13* care permite rularea de transport a acestuia. Cuva transformatorului este umplută cu ulei prin robinetul *14* de umplere sau de golire. Presiunea uleiului în transformator este asigurată prin existența unui rezervor *15* (conservator) de ulei plasat în partea superioară și prevăzut cu indicatorul de nivel *16*.

Temperatura uleiului este verificată cu ajutorul termometrului *17* situat pe capac. Prin intermediul inelelor *18* transformatorul poate fi ridicat și transportat cu ajutorul unei macarale sau pod rulant.

În figura 6.6 se prezintă aspectul exterior al unui transformator trifazat.

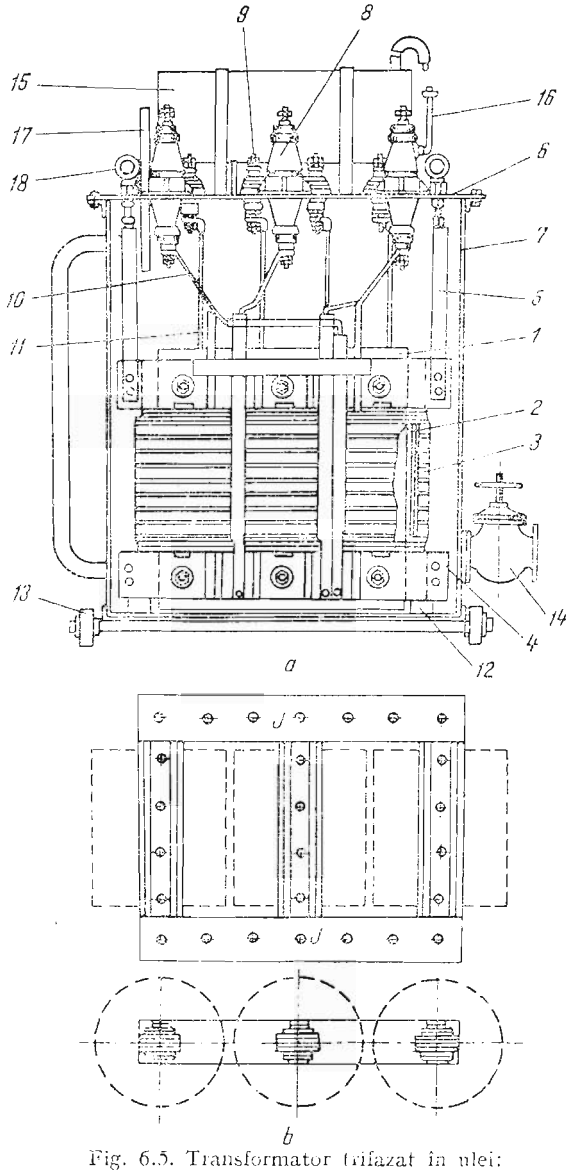


Fig. 6.5. Transformator trifazat în ulei:
a — secțiune prin cuvă; *b* — miezul magnetic.

● **Răcirea.** Deoarece pierderile în transformator (în fier și în conductoare) reprezintă surse de încălzire, transformatoarele trebuie răcite pentru ca temperatura lor să nu depășească anumite valori (de exemplu 70 ... 120°C).

Răcirea transformatoarelor se face prin radiație și prin convecție (circulație) cu aer în cazul transformatoarelor uscate; transformatoarele cu ulei se răcesc prin vehicularea uleiului din cuvă care se ridică în sus circulînd apoi de sus în jos prin niște țevi de radiație plasate în afara cuvei (v. fig. 6.5 și 6.6).

La transformatoarele mari (peste 40 MVA) circulația uleiului este forțată — împins cu o pompă — răcirea uleiului făcîndu-se uneori cu apă într-un schimbător de căldură.

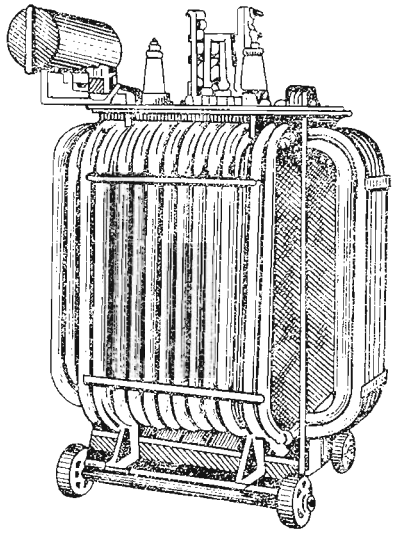


Fig. 6.6. Aspectul exterior al unui transformator trifazat de 6,3/0,4 kV, 630 kVA.

Atenție! Umiditatea reprezintă cel mai mare pericol pentru bobinajele de înaltă tensiune; de aceea în toate situațiile transformatorul trebuie foarte bine izolat, așa încît în ulei să nu pătrundă nici cea mai mică urmă de umiditate care produce scăderea rigidității dielectrice (v. cap. I).

● **Grupe de conexiuni.** Înfășurările de pe cele trei faze — primare sau secundare — se leagă între ele în diverse moduri (conexiuni) și anume:

— conexiunea STEA — Y

— conexiunea TRIUNGHI — Δ

— conexiunea ZIGZAG — Z

Observație. Dacă conexiunea stea are neutrul scos pe capac ea se notează Y_0.

Pentru a fi complet definită grupa de conexiuni este însoțită de un număr (de obicei *11, 1, 5, 7*) care indică defazajul între tensiunea secundară și cea primară lucru obținut prin modul de legare — succesiune — al celor trei înfășurări *R, S* și *T*. Pentru aceasta se consideră, înfășurările pe cele trei faze ale unui transformator trifazat (fig. 6.7, *a*) și se marchează cu *A, B, C* începuturile — bornele polarizate — și cu *U, V, W*

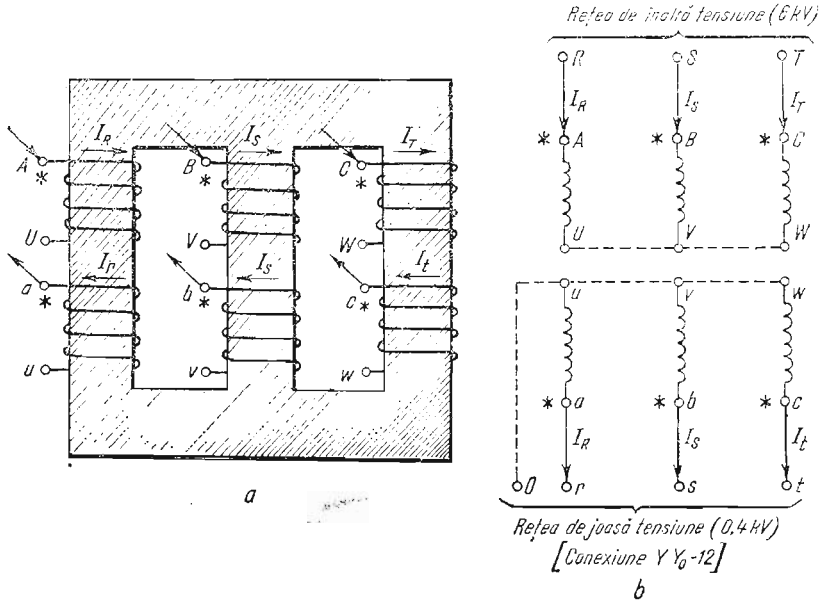


Fig. 6.7. Notarea bornelor la un transformator trifazat:
a — schema reală; *b* — reprezentarea simbolică.

sfîrșiturile înfășurărilor primare (aferente fazelor R, S, T) respectiv cu a, b, c începuturile — bornele polarizate — și cu u, v, w sfîrșiturile înfășurărilor secundare (aferente fazelor r, s, t). Schematic (simbolic) înfășurările se prezintă ca în figura 6.7, *b* adică înfășurarea secundară este rabătută cu 180° (bornele polarizate primare în partea de sus iar cele secundare în jos).

Dacă se execută legarea înfășurărilor ca în figura 6.7, *b* — indicat punctat— se obține grupa de conexiuni *YY12*.

Observație. În cazul acestei conexiuni dacă, de exemplu, la momentul $t = 0$ curentul de pe faza $R(I_R)$ intră în borna polarizată A și are valoarea maximă, în același moment curentul I_r, iese din borna polarizată a și are valoarea maximă.

Curentul I_r este deci în fază cu I_R adică cei doi fazori se suprapun așa cum la un ceasornic limba mică (fazorul I_r) arată ora 12 cînd limba mare (fazorul I_R) se află la ora 12.

Modul de conectare — grupele de conexiuni — cele mai uzuale ale transformatoarelor trifazate sînt prezentate în tabelul 6.1 împreună cu poziția relativă a fazorilor de curent de pe una din faze (I_R și I_r).

Observația 1. Numărul care caracterizează fiecare grupă de conexiuni reprezintă chiar unghiul între cei doi fazori exprimat în ore de pe cadranul unui ceasornic (1 oră = 30°).

Observația 2. Schema de conexiuni YΔ5 (poziția 5) se obține din schema YΔ11 (poziția 3) prin inversarea stelei pe partea primară (se leagă în scurtcircuit bornele A, B, C în loc de U, V, W) astfel că faza curentului se inversează cu 180° — opoziție de fază. În adevăr cifra 5 pe ceasornic este opusă lui *11*.

Aceeași observație pentru conexiunile YΔ7 cu YΔ1.

Observația 3. Conexiunea ΔY1 (poziția 8) este identică cu YΔ11 cu alimentarea inversată (R, S, T se inversează cu r, s, t). La fel mai există și grupele de conexiuni ΔY11 (≡ YΔ11), ΔY5 (≡ YΔ7) și YΔ7 (≡ YΔ5) care nu au mai fost figurate.

Conexiunile în stea (*Y*) se adoptă pentru tensiunile foarte mari (110; 220; 400 și 750 kV) unde rețelele au neutrul legat la pămînt; de asemenea și la tensiunea de 220/380 V (0,4 kV) avînd nevoie de firul (conductorul) de nul pentru distribuția curentului monofazat.

Conexiunile în triunghi (Δ) se adoptă pentru tensiunile medii (6,3; 15; 20 și 35 kV) unde rețelele funcționează cu neutrul izolat.

Conexiunea stea-zigzag (*Z*) (fig. 6.8) se folosește exclusiv la 0,4 kV în scopul uniformizării încărcării fazelor. Din figura 6.8 se constată că consumul fazei r este preluat de pe fazele R și S ș.a.m.d.

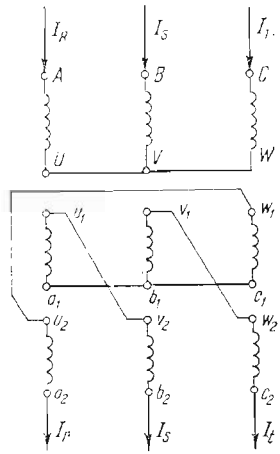
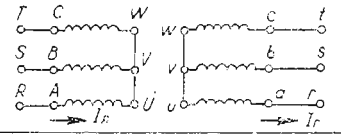
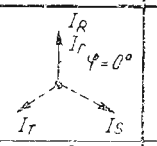
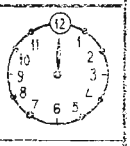
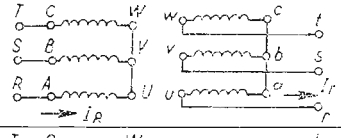
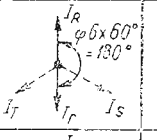
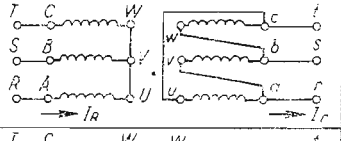
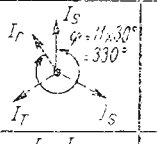
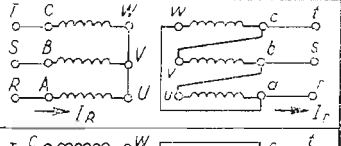
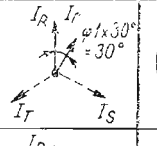
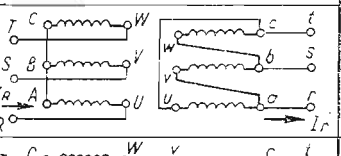
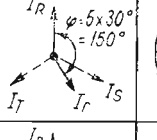
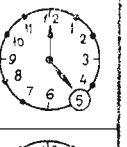
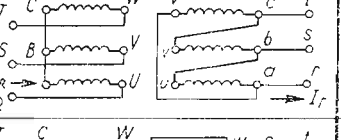
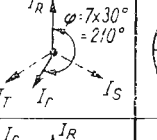
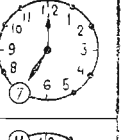
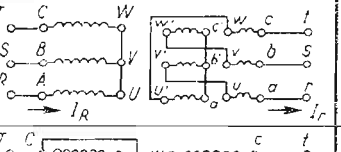
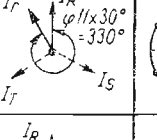
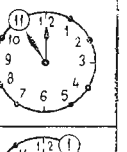
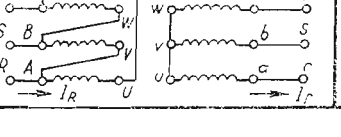
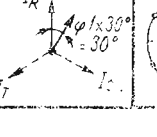
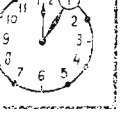


Fig. 6.8. Conexiunea stea-zigzag.

Tabelul 6.1.

Poz	Grupa de conexiuni	Schema de conecțiuni	Digrama fazorială	Indicația ceasornicului
1	Yy - 12			
2	Yy - 6			
3	Yd - 11			
4	Yd - 1			
5	Yd - 5			
6	Yd - 7			
7	Yz - 11			
8	Dy - 1			

5. FUNCȚIONAREA ÎN PARALEL A TRANSFORMATOARELOR

Uneori, un consumator poate fi alimentat simultan prin două, trei sau chiar mai multe transformatoare funcționînd în paralel. Aceasta înseamnă că transformatoarele sînt alimentate de la aceeași bară de înaltă tensiune (de exemplu 110 kV — fig. 6.9) și debitează pe aceeași bară a consumatorului (de exemplu 6 kV).

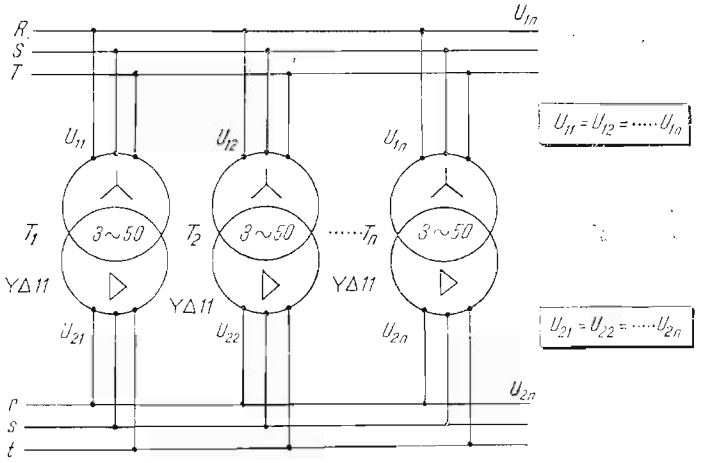


Fig. 6.9. Funcționarea în paralel a transformatoarelor.

Rațiunea funcționării în paralel a transformatoarelor este aceea de a permite ca, pe de o parte, în regim de funcționare normală, la reducerea consumului să poată fi scoase din funcțiune și o parte din transformatoare, iar pe de altă parte în regim de avarie (defectare) a unui transformator celelalte transformatoare printr-o suprasarcină (supraîncărcare) să asigure alimentarea în continuare a consumatorului.

Pentru a putea funcționa în paralel, transformatoarele trebuie să îndeplinească următoarele condiții:

— să aibă aceleași tensiuni nominale primare și respectiv secundare și deci să aibă același raport de transformare;

— raportul puterilor a două transformatoare oarecare să fie cuprins în domeniul $\frac{1}{3} \cdots \frac{3}{1}$;

— să aibă aceeași clasă de conexiuni (v. tabelul 6.1).

Dacă abaterile mici de la primele două condiții pot avea oarecare influențe asupra bunei funcționări, permițînd totuși funcționarea în paralel a transformatoarelor, condiția identității clasei de conexiuni este absolut obligatorie, nerespectarea producînd avarii grave.

C. MAȘINI DE CURENT CONTINUU

1. PRODUCEREA CURENTULUI CONTINUU

Se reia generatorul din figura 4.1 însă capetele spirei în loc să se aducă la inelele A și B, se conectează la două jumătăți de inel A și B izolate între ele (colector) (fig. 6.10), iar periile P_1 și P_2 sînt plasate în opoziție (sus și jos) pe axa polilor. Prin rotirea spirei în cîmpul magnetic, procesul este același ca în cazul prezentat în figura 4.1, în schimb modul de colectare diferit determină obținerea unei tensiuni continue (pulsatorie) (fig. 6.11, *a*).

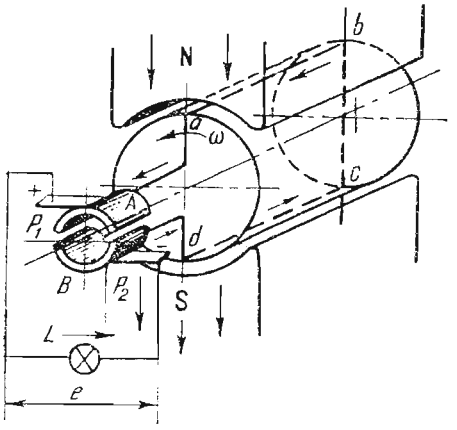


Fig. 6.10. Principiul producerii curentului continuu.

Observație. Polaritatea celor două jumătăți de inel se schimbă de două ori la fiecare rotație a spirei (la fiecare perioadă T) astfel că, de exemplu, peria de sus (P_1) preia numai tensiunea (semiperioada) pozitivă.

Dacă în locul unei spire se introduc două spire așezate perpendicular una pe cealaltă, ale căror capete se leagă la patru lame de colector (inelul se împarte în patru), tensiunea rezultată e capătă forma din figura 6.11, *b* etc.

Observație. Se constată că cu cît numărul de spire decalate este mai mare, deci numărul lamelelor de colector este mai mare, numărul ondulațiilor pe o perioadă este mai mare, iar amplitudinea lor este mai mică, adică se tinde spre un curent practic continuu.

Tensiunea continuă astfel produsă este culeasă prin periile P_1 și P_2 (fig. 6.10) și poate alimenta un consumator — de exemplu lampa L. Aceasta este forma cea mai simplă de producere a curentului continuu, iar elementul descris constituie un *generator de curent continuu* sau *dinam*.

Și în acest caz, fenomenul prezentat este reversibil în sensul că, aplicîndu-se prin periile P_1 și P_2 o tensiune continuă, spira (bobina) descrie o mișcare de rotație deci este capabilă să producă un lucru mecanic. S-a obținut astfel un motor de curent continuu.

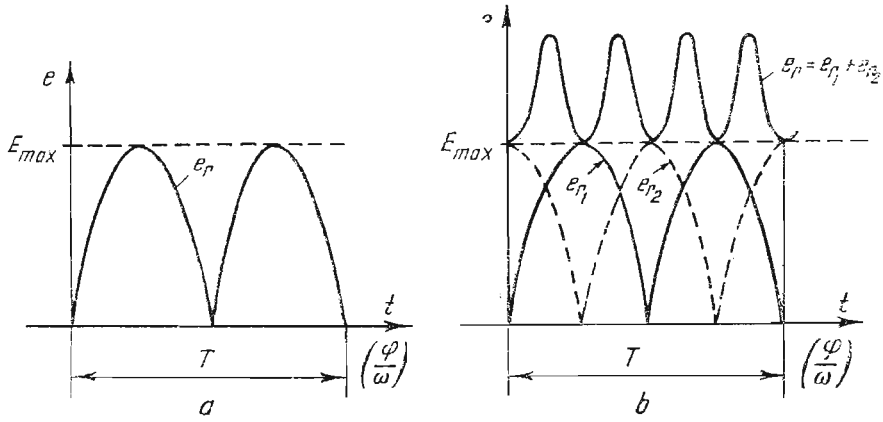


Fig. 6.11. Diagrama tensiunii continue (pulsatorie):
a — cazul cu o spiră; *b* — cazul cu două spire.

Notă. În toate cazurile descrise mai sus — GENERATOR (MOTOR) de CURENT ALTERNATIV (CONTINUU) — cîmpul magnetic B produs de polii N și S este creat de obicei printr-o bobină statorică alimentată în curent continuu, numită bobină sau înfășurare de excitație (care nu a fost figurată în figurile 4.1 și 6.10).

Constructiv, o mașină de curent continuu se compune din trei părți principale: *inductorul, indusul* și *colectorul.*

● **Inductorul** este partea din mașină care produce cîmpul magnetic (cîmpul inductor). El este realizat sub forma unor poli magnetici din oțel electrotehnic, pe care sînt înfășurate bobinele de curent continuu (excitație). Inductorul este introdus într-o carcasă circulară de oțel cu care constituie, împreună *statorul* („care stă") mașinii (fig. 6.12, *a*). Carcasa este prevăzută la partea superioară cu un inel (ochi) de ridicare.

● **Indusul** mașinii este format dintr-un miez de oțel confecționat din tole — table — suprapuse izolate între ele și prevăzut cu crestături longitudinale. În aceste crestături sînt introduse spirele în care se induc tensiunile electromotoare. Între inductor și indus este prevăzut un spațiu mic (cîțiva milimetri), numit *întrefier* (între cele două părți de fier).

● **Colectorul** este acea parte a mașinii formată din lame colectoare (confecționate din cupru), la care se leagă capetele bobinajelor indusului și prin care se colectează tensiunea continuă. Indusul împreună cu colectorul sînt plasați pe un ax, constituind împreună *rotorul* (care se rotește) mașinii (fig. 6.12, *b*). Pe rotor, în afara indusului *3* și colectorului *2* se află și ventilatorul *1*, care are rolul de a sulfa aer în întrefier în scopul răcirii mașinii.

Rotorul este montat centrat față de stator cu ajutorul scutului din spate (fig. 6.12, *c*) și al scutului din față (fig. 6.12, *d*) plasat spre colector. Pe scutul din față este montat suportul portperiilor (fig. 6.12, *e*) cu ajutorul buloanelor **1**, periile *2* fiind apăsate cu resoarte pe colector.

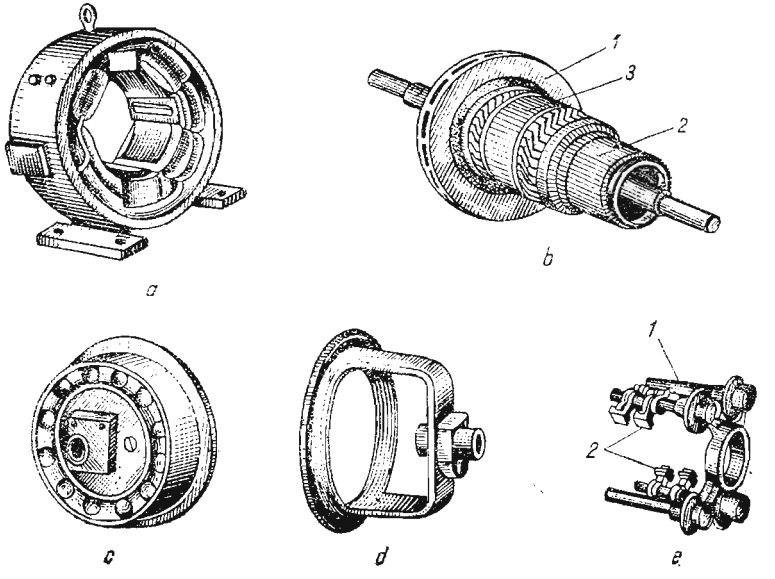


Fig. 6.12. Părțile componente ale mașinii de curent continuu:
a — stator (inductor); *b* — rotor (indus); *c* — scut din spate; *d* — scut din față; *e* — suport portperii.

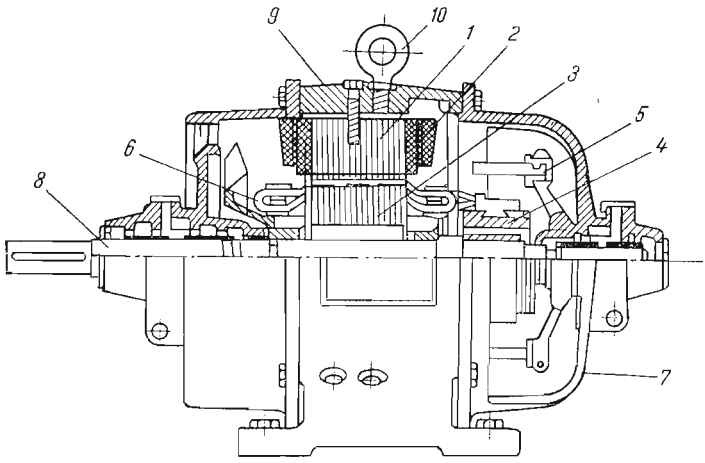


Fig. 6.13. Secțiune printr-o mașină de curent continuu.

În figura 6.13 este prezentată o secțiune printr-o mașină de curent continuu formată din piesele din figura 6.12 însă montate (*1* — inductor; *2* — bobină de excitație; *3* — indus; *4* — colector; *5* — portperii; *6* — capetele bobinelor indusului; *7* — scut; *8* — ax; *9* — carcasă; *10* — inel de ridicare).

3. GENERATOARE DE CURENT CONTINUU

Se consideră un generator de curent continuu (fig. 6.14, *a*) al cărui indus este învîrtit cu viteza unghiulară ω, respectiv cu viteza periferică v de către motorul primar, în sensul săgeții n_G în cîmpul magnetic de inducție B produs de polii magnetici N și S.

Tensiunea electromotoare de inducție E se determină ca valoare cu ajutorul relației (v. cap. 4):

$$E = Kn\Phi \tag{6.12}$$

în care:

K este o constantă constructivă*;

n — turația generatorului (rot/min);

Φ — fluxul total inductor (Wb).

Sensul tensiunii electromotoare (t.e.m.) induse E se determină cu regula mîinii drepte (de exemplu, pentru un conductor situat în zona polului nord, are sensul din figura 6.14, *c*).

● **Ecuația fundamentală.** Dacă la bornele generatorului (la perii) se leagă un consumator (o rezistență ohmică) va lua naștere un curent I avînd același sens cu t.e.m. adică MAȘINA ELECTRICĂ funcționează ca GENERATOR.

---

* Depinde de:

— numărul de perechi de poli (p);

— numărul de bobine în paralel (a);

— numărul de spire într-o bobină (n_s): $K = \dfrac{pn_s}{60 \cdot a}$.

Notîndu-se cu R_a rezistența înfășurării rotorului și cu U tensiunea la bornele generatorului, se poate scrie*:

$$U = E - R_a I. \qquad (6.13)$$

Aceasta reprezintă ecuația fundamentală a generatorului de curent continuu.

Observație. Tensiunea la borne U este, în cazul generatorului, mai mică decît tensiunea electromotoare E:

$$U < E.$$

● **Bilanțul puterilor și randamentul.** Interacțiunea conductoarelor rotorului parcurse de curentul I cu cîmpul inductor produce forțele electromagnetice F care se opun mișcării (de sens contrar vitezei v — V cap. 4).

Sensul în care acționează forțele F se determină cu regula mîinii stîngi (de exemplu, pentru un conductor situat în zona polului nord, sensul fiind cel din figura 6.14, *b*). Aceste forțe produc asupra rotorului (indusului) un cuplu electromagnetic care tinde să-l rotească în sens contrar sensului de rotație al motorului de antrenare.

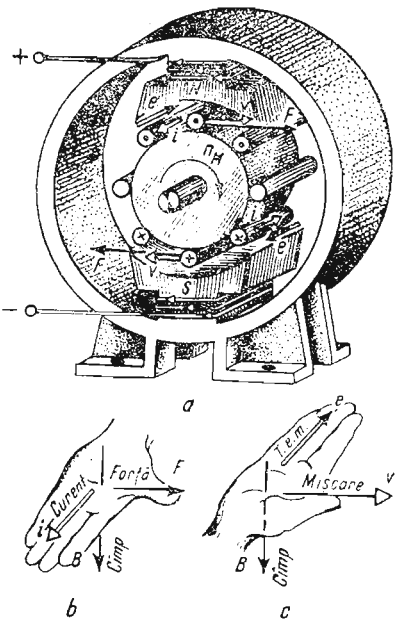


Fig. 6.14. Generator de curent continuu:
a — secțiune; *b* — determinarea sensului forțelor electromagnetice (F); *c* — determinarea sensului tensiunii electromotoare (E).

Observație. În generator, cuplul electromagnetic este un cuplu rezistent.

Reluîndu-se ecuația fundamentală a generatorului și înmulțindu-se cu curentul I, se obține:

$$UI = EI - R_a I^2 \qquad (6.14)$$

sau

$$P_G = P_M - \Delta P_G,$$

în care:

$P_G = UI$ este puterea electrică debitată (generată) în rețea;

$P_M = EI$ — puterea mecanică primită de la motorul de antrenare;

$\Delta P_G = R_a I^2$ — pierderea de puterea în rotor prin efect Joule-Lenz.

Aceasta reprezintă relația bilanțului puterilor în generatorul de curent continuu.

Randamentul generatorului de curent continuu este:

$$\eta_G = \frac{P_G}{P_M} = \frac{UI}{EI} = \frac{U}{E}.$$

În funcție de modul de alimentare a înfășurării de excitație (inductor), mașinile de curent continuu (generator sau motor) pot fi cu:

— *excitație separată* (fig. 6.14, *a*), adică folosind o sursă din afară (de exemplu o baterie de acumulatoare);

— *excitație proprie* (autoexcitație), curentul fiind preluat chiar de la mașina respectivă. Se disting următoarele moduri de excitație proprie:

* Este aceeași ecuație scrisă pentru o sursă (acumulator) de t.e.m. E și rezistență internă R_a.

— *excitație serie* (fig. 6.15, *b*) — inductorul este legat în serie cu indusul;
— *excitație derivație* (fig. 6.15, *c*) — inductorul este legat în paralel cu indusul;
— *excitație mixtă* (fig. 6.15, *d*) — inductorul are două bobinaje — unul serie R_s și altul derivație R_d.

În figura 6.16, *a* se prezintă ca exemplu modul de conectare la rețea a unui generator de curent continuu cu excitație derivație iar în figura 6.16, *b* schema electrică corespunzătoare.

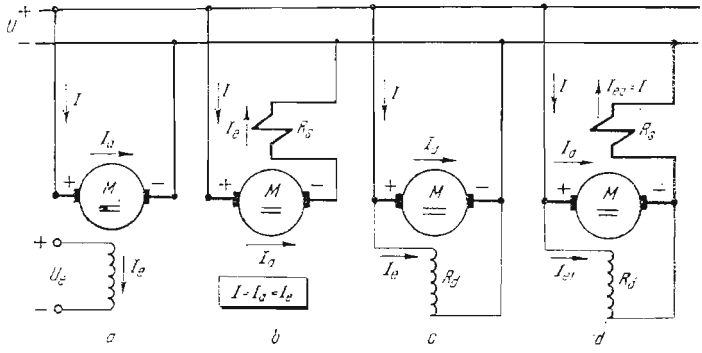


Fig. 6.15. Excitarea mașinilor de curent continuu:
a — separată; *b* — serie; *c* — derivație; *d* — mixtă.

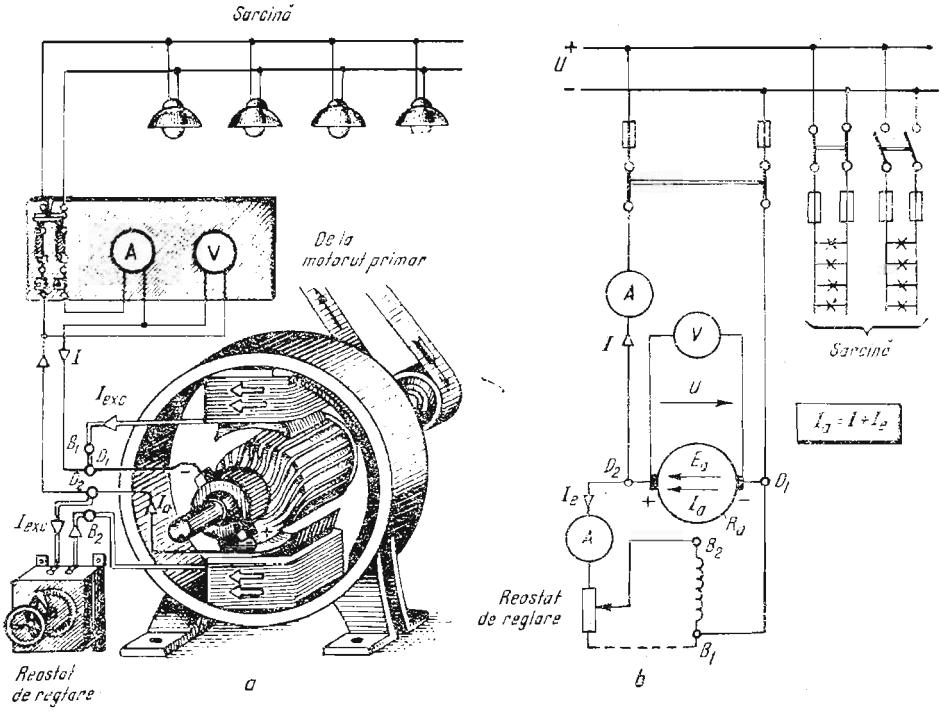


Fig. 6.16. Generaror cu excitație derivație:
a — mod de conectare; *b* — schema electrică.

Se observă că în circuitul de excitație este prevăzut un reostat de reglare cu ajutorul căruia se modifică curentul de excitație (I_{exc}), deci și tensiunea de la borne (U). De exemplu, conform celor arătate mai sus, se poate scrie*:

$$I_{exc} \nearrow \Rightarrow B \nearrow \Rightarrow \Phi \nearrow \Rightarrow E \nearrow \Rightarrow U$$

Utilizări. Generatoarele de curent continuu se folosesc pe scară redusă la producerea energiei electrice; astfel de exemplu se utilizează: grupuri electrogene mobile, pe autovehicule, grupuri pentru sudură etc.

4. MOTOARE DE CURENT CONTINUU

● **Ecuația fundamentală.** Deoarece mașinile electrice sînt reversibile (pot funcționa și ca generator și ca motor), se va considera același generator din figura 6.14, *a* însă la care cuplul primit de la motorul primar a dispărut (de exemplu s-a rupt cureaua de transmisie). În acest caz generatorul tinde să se oprească (viteza v scade, adică turația n scade) și considerînd că excitația sa este separată, adică Φ = constantă, rezultă că tensiunea electromotoare E va scădea proporțional cu turația ($E = K\Phi n$).

Cînd $E = U$ curentul I devine zero și se spune că mașina funcționează în gol (este la limita dintre generator și motor).

Mașina va continua să-și reducă turația, deci tensiunea electromotoare să acadă, iar cînd $E < U$ ecuația fundamentală a mașinii, devine:

$$U = E + R_a I \qquad (6.16)$$

Curentul își schimbă sensul de circulație, iar mașina electrică devine motor (fig. 6.17, *a*).

Observații:

1 — Inversarea sensului curentului I produce inversarea sensului forțelor electromagnetice F (de exemplu pentru un conductor situat în zona polului nord, au sensul dat în figura 6.17, *b*).

2 — Turația n_M își păstrează același sens ca și turația generatorului, cu mențiunea că $n_M < n_G$ și deci sensul visezei v se păstrează;

3 — Forțele F capătă același sens cu viteza v și ca urmare cuplul electromagnetic la motor devine un cuplu activ.

4 — Tensiunea electromotoare indusă E are același sens ca și în cazul generatorului (de exemplu pentru un conductor situat în zona polului nord are sensul dat în figura 6.17, *c*).

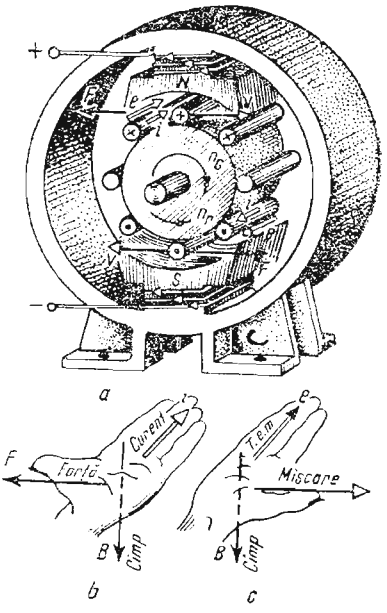


Fig. 6.17. Motor de curent continuu: *a* — secțiune; *b* — determinarea sensului forțelor electromagnetice (F); *c* — determinarea sensului tensiunii electromotoare (E).

* Se folosesc următoarele simboluri:

↗ arată că mărimea respectivă crește;

↘ arată că mărimea scade.

● **Bilanțul puterilor și randamentul.** Din ecuația fundamentală a motorului de curent continuu:

$$U = E + R_a I$$

prin înmulțire cu curentul I, se obține:

$$UI = EI + R_a I^2 \tag{6.17}$$

sau

$$P_A = P_M + \Delta P_M \tag{6.18}$$

în care:

$P_A = UI$ este puterea electrică absorbită (consumată) din rețea;
$P_M = EI$ — puterea mecanică transmisă sarcinii de către motor;
$\Delta P_M = R_a I^2$ — pierderea de putere în rotor prin efect Joule-Lenz.

Aceasta reprezintă relația bilanțului puterilor în motorul de curent continuu.

Randamentul motorului de curent continuu este:

$$\eta_M = \frac{P_M}{P_A} = \frac{EI}{UI} = \frac{E}{U}.$$

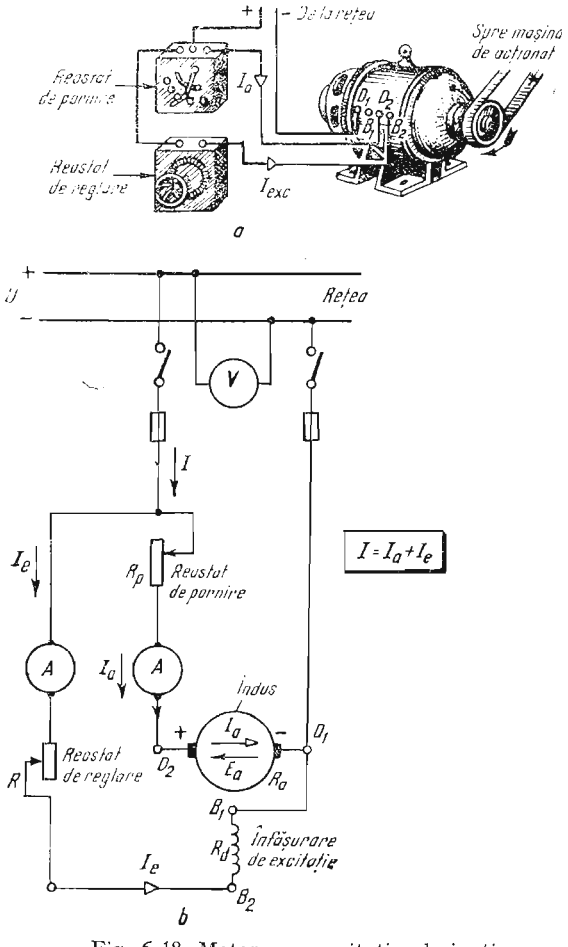


Fig. 6.18. Motor cu excitație derivație: *a* — mod de conectare; *b* — schema electrică.

● **Tipuri de excitație.** Cele patru tipuri de excitație din figura 6.15 sînt valabile și la motoare.

În figura 6.18, *a* se prezintă ca exemplu modul de conectare la rețea a unui motor de curent continuu cu excitație derivație, iar în figura 6.18, *b* — schema electrică corespunzătoare.

Se observă că în afara reostatului de reglare pentru modificarea curentului de excitație (de exemplu $I_{exc} \nearrow \Rightarrow B \nearrow \Rightarrow \Phi \nearrow \Rightarrow E \nearrow$), este prevăzut un reostat de pornire care are rolul de a limita curentul absorbit de motor în perioada de pornire. Reostatul de pornire se scoate treptat din circuit.

● **Cuplul electromagnetic.** Efectul forțelor F (fig. 6.17) este producerea cuplului electromagnetic C_M — cuplul activ sau motor — care asigură pu-

terea mecanică P_M transmisă sarcinii de către motor. Relația de dependență între putere și cuplu este:

$$P_M = C_M \Omega \tag{6.19}$$

în care:

Ω este viteza unghiulară [rad/s] care este proporțională cu turația n [rot/min]:

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60}. \tag{6.20}$$

Deoarece $P_M = EI$ relația (6.19) devine:

$$P_M = C_M \Omega = EI. \tag{6.21}$$

Ținînd seama de relațiile (6.12) și (6.20) din expresia (6.21) se obține:

$$C_M = \frac{EI}{\Omega} = \frac{Kn\Phi I}{\frac{2\pi n}{60}} = K_C \Phi I \tag{6.22}$$

în care: $K_C = \frac{30\,K}{\pi}$ este o constantă.

Observație. La motoarele cu excitație separată sau derivație fluxul fiind constant rezultă că cuplul motor este proporțional cu curentul absorbit de motor; la motoarele cu excitație serie fluxul fiind proporțional * cu curentul I rezultă că cuplul motor este proporțional cu pătratul curentului I ($C_M = K_0 I^2$).

● **Caracteristicile mecanice.**

Înlocuind relația (6.12) în (6.16) se obține:

$$U = E + R_a I = K\Phi n_M + R_a I \tag{6.23}$$

de unde se deduce:

$$n_M = \frac{U - R_a I}{K \cdot \Phi} \tag{6.24}$$

Relația (6.24) mai poate fi scrisă sub forma:

$$n_M = \frac{U}{K\Phi} - \frac{R_a I}{K\Phi} = n_0 - \Delta n \tag{6.25}$$

în care s-a notat:

$n_0 = \frac{U}{K\Phi}$ = *turația de gol*, numită astfel deoarece la mersul în gol adică la trecerea din regimul de generator în cel de motor sau invers $I = 0$ deci $n_M = n_0$;

$\Delta n = \frac{R_a I}{K\Phi}$ = *căderea de turație*, numită astfel deoarece pe măsură ce curentul crește, turația scade.

---

* Se presupune că mașina funcționează în regim magnetic nesaturat $\left(\Phi = \frac{nI}{l} S\mu\right)$.

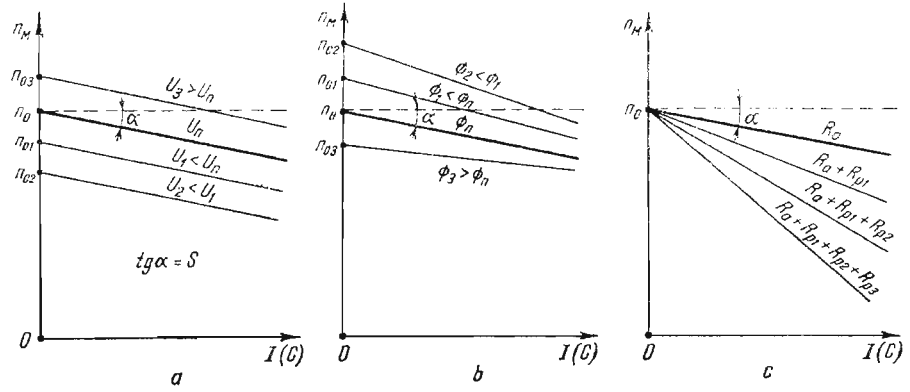


Fig. 6.19. Caracteristicile mecanice ale motorului de curent continuu cu excitație separată (derivație):

a — caracteristica artificială la tensiune variabilă; *b* — caracteristica artificială la flux magnetic variabil; *c* — caracteristica artificială la rezistența rotorică variabilă.

Relația (6.25) prezintă importanță deosebită la motoarele cu excitație separată sau cu excitație derivație la care fluxul este practic constant [$\Phi = $ = ct] și ea definește caracteristica mecanică a motorului [$n_M = f(I)$].

Într-o diagramă avînd axele de coordonate n_M și I funcția $n_M = f(I)$ reprezintă o dreaptă avînd (fig. 6.19):

— panta $S = \text{tg}\ \alpha = -\dfrac{R_a}{K \cdot \Phi}$;

— ordonata la origine $n_0 = \dfrac{U}{K \cdot \Phi}$.

Dacă parametrii motorului sînt cei nominali ($U = U_n$; $\Phi = \Phi_n$ și $R_a = $ = R_{an}) dreapta $n_M = f(I)$ reprezintă *caracteristica mecanică naturală*, iar dacă unul din cei trei parametri diferă de valorile nominale se obțin *caracteristici mecanice artificiale*. Astfel din relația (6.25) se constată că:

— pentru $U \neq U_n$ panta dreptelor $\left[S = -\dfrac{R_a}{K \cdot \Phi}\right]$ se păstrează deoarece nu depinde de U, în schimb turația de gol n_0 $\left[n_0 = \dfrac{U}{K \cdot \Phi}\right]$ se modifică proporțional cu tensiunea (fig. 6.19, *a*);

— pentru $\Phi \neq \Phi_n$ se modifică și panta și turația de gol în raport invers proporțional cu Φ (fig. 6.19, *b*);

— pentru $R_a \neq R_{an}$ (ceea ce se obține prin adăugarea unei rezistențe suplimentare R_p a reostatului de pornire la rezistența rotorică R_a) turația de gol se păstrează, în schimb panta crește proporțional cu rezistența adițională R_p (fig. 6.19, *c*) panta caracteristicii mecanice devenind $S = -\dfrac{R_a + R_p}{K \cdot \Phi}$.

Aceste caracteristici mecanice artificiale sînt folosite frecvent pentru comanda motoarelor respective.

Din relația (6.22) rezultă pentru curent expresia:

$$I = \frac{C}{K_C \cdot \Phi} \tag{6.26}$$

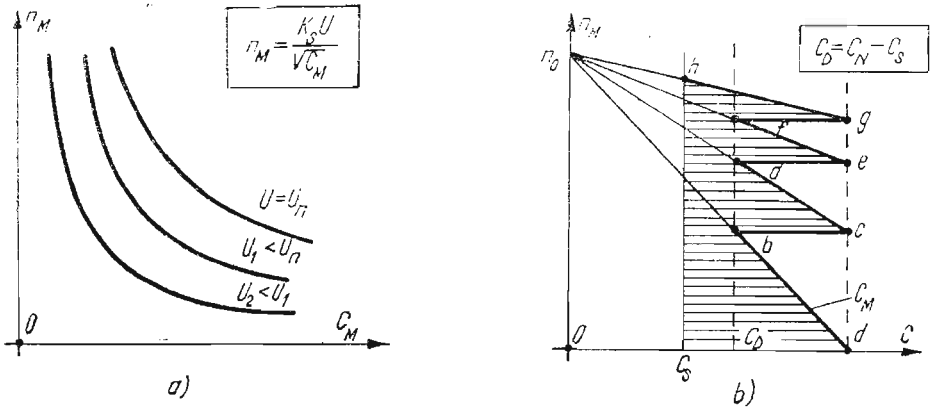


Fig. 6.20. Caracteristicile mecanice ale motorului de curent continuu cu excitație serie.

care înlocuită în (6.25) conduce la o nouă formă analitică a caracteristic mecanice:

$$n_M = \frac{U}{K \cdot \Phi} - \frac{R_a C}{K \cdot \Phi K_C \Phi} = \frac{U}{K \cdot \Phi} - \frac{R_a C}{K_A \Phi^2} \tag{6.27}$$

în care

$$K_A = K K_C.$$

S-a obținut astfel o nouă relație $n_M = f(C)$ care determină grafic caracteristici mecanice artificiale similare cu cele din figura 6.19 (în abscisă este înlocuit I cu C).

La motoarele de curent continuu cu excitație serie, datorită faptului că cuplul este proporțional cu pătratul curentului [$C_M = K_0 I^2$] caracteristicile mecanice sînt definite de relația:

$$n_M = \frac{K_s U}{\sqrt{C_M}} \tag{6.28}$$

și au aspectul grafic din figura 6.20.

5. ACȚIONAREA CU MOTOARE DE CURENT CONTINUU

● **Pornirea.** Pentru toate tipurile de motoare de curent continuu pornirea se efectuează cu rezistența de pornire R_p (reostat) montată în serie. Considerînd de exemplu un motor M cu excitație separată (fig. 6.21, *a*) iar reostatul de pornire fiind cu ploturi ($R_p = R_{p1} + R_{p2} + R_{p3}$) se alege valoarea rezistenței R_p a acestuia astfel ca la pornire ($n_M = 0$) curentul I_p să fie limitat la o valoare de 2 ... 2,5 ori curentul nominal. Din relația (6.25) se scrie:

$$n_M = \frac{U_n}{K \cdot \Phi} - \frac{(R_p + R_a) \cdot I_p}{K \cdot \Phi} = 0 \tag{6.29}$$

de unde rezultă:

$$R_p = \frac{U_n}{I_p} - R_a. \tag{6.30}$$

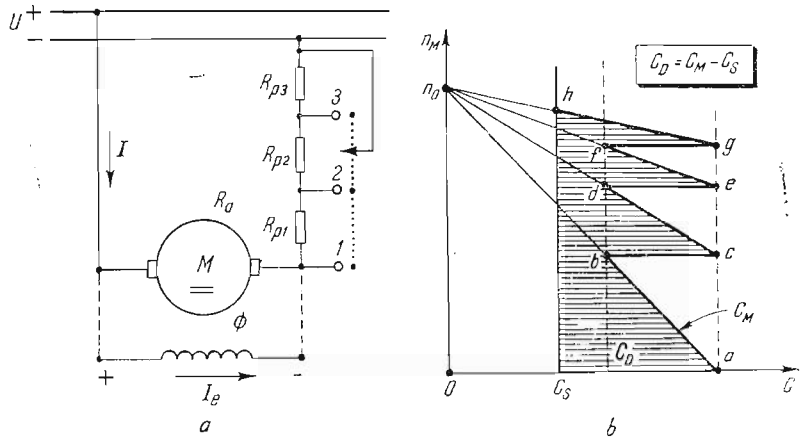


Fig. 6.21. Pornirea motorului de curent continuu tip derivație:
a — schema electrică; *b* — diagrama pornirii.

Pe diagrama din figura 6.21, *b* se trasează pe lîngă caracteristicile artificiale pentru $R_a + R_{p1} + R_{p2} + R_{p3}$ (plotul *3*); $R_a + R_{p1} + R_{p2}$ (plotul *2*); $R_a + R_{p1}$ (plotul *1*) și R_a (plotul 0 — caracteristica naturală) și caracteristica cuplului de sarcină C_s. Cuplul activ se va modifica succesiv astfel că va trece prin punctele *a* (pornire — plotul *3*), *b* — *c* (plotul *2*), *d* — *e* (plotul *1*), *f* — *g* (plotul 0) funcționarea permanentă a motorului făcîndu-se în punctul *h* unde $C_M = C_S$.

În regimul de pornire diferența celor două momente reprezintă cuplul accelerator C_D (v. relația 6.1):

$$C_M - C_S = C_D \tag{6.31}$$

care în figura 6.21, *b* a fost prezentat haşurat.

● **Frînarea** (oprirea) motoarelor de curent poate fi:

— *naturală* — prin întreruperea alimentării de la rețea cu sau fără o frînare mecanică (de exemplu frînă cu electromagnet);

— *forțată* la care timpul de oprire este redus în mod voit printr-o intervenție în circuitul electric.

În continuare sînt prezentate schemele principiale pentru unele moduri de frînare forțată.

— *Frînarea forțată prin contracurent* (fig. 6.22, *a*) este asigurată prin inversarea polarității tensiunii U aplicate motorului M — deschiderea contactelor C_1 și C_2 și închiderea contactelor C_3 și C_4 ceea ce are ca efect inversarea sensului cuplului motor (inversarea sensului curentului I — v. relația 6.22).

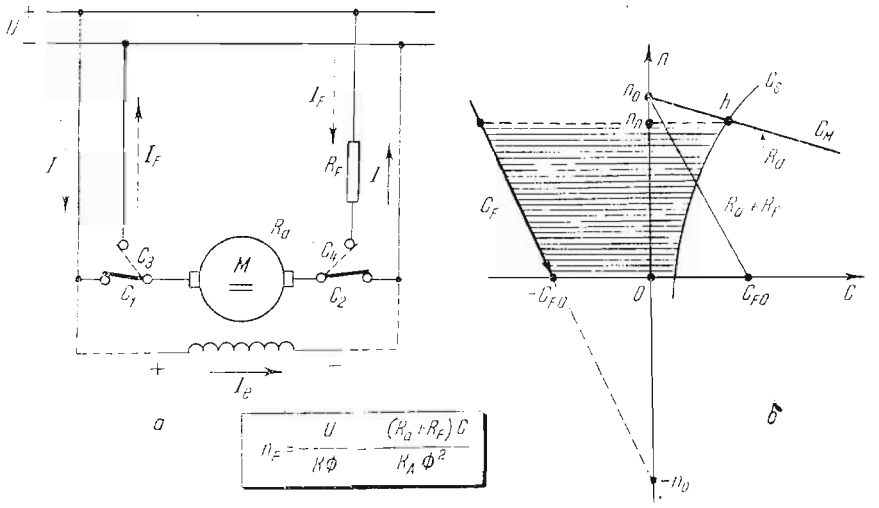


Fig. 6.22. Frînarea forțată prin contracurent:
a – schema electrică; *b* – diagrama frînării.

La conectarea inversă se introduce și o rezistență de frînare R_F (fig. 6.22, *b*) ceea ce face ca panta caracteristică de frînare C_F să crească. Din figura 6.22,*b* se observă că porțiunea hașurată reprezintă cuplul dinamic de frînare $C_D(C_D = C_S + C_F)$.

— *Frînarea forțată reostatică* (fig. 6.23, *a*) este asigurată prin deconectarea motorului M de la rețea și închiderea sa pe o rezistență R_F; se deschide contactul C_1 și se închide C_2. Deoarece în acest caz $U = 0$ rezultă $n_0 = 0$, adică caracteristica mecanică trece prin origine avînd panta proporțională cu R_F (fig. 6.23, *b*). Ca și în cazul precedent a fost hașurat cuplul dinamic de frînare C_F.

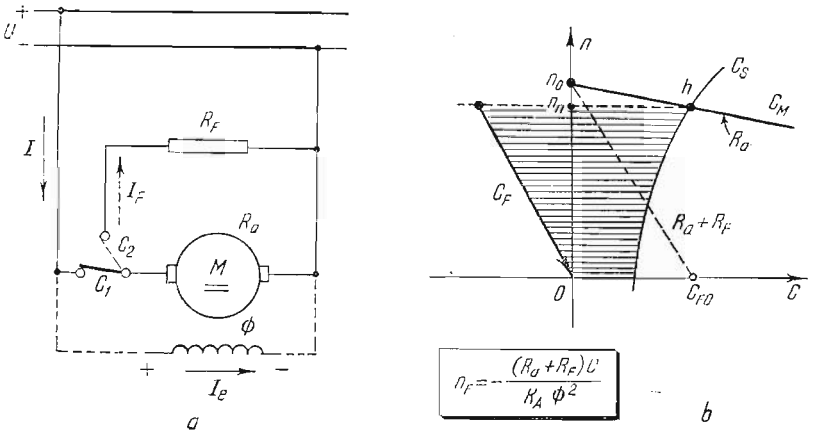


Fig. 6.23. Frînarea forțată reostatică:
a – schema electrică; *b* – diagrama frînării.

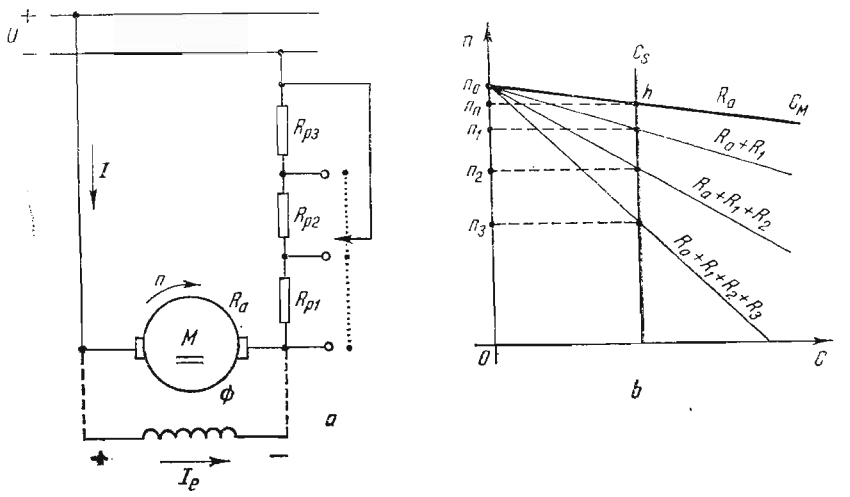


Fig. 6.24. Varierea vitezei prin modificarea rezistenței rotorice:
a — schema electrică; *b* — diagrama varierii vitezei.

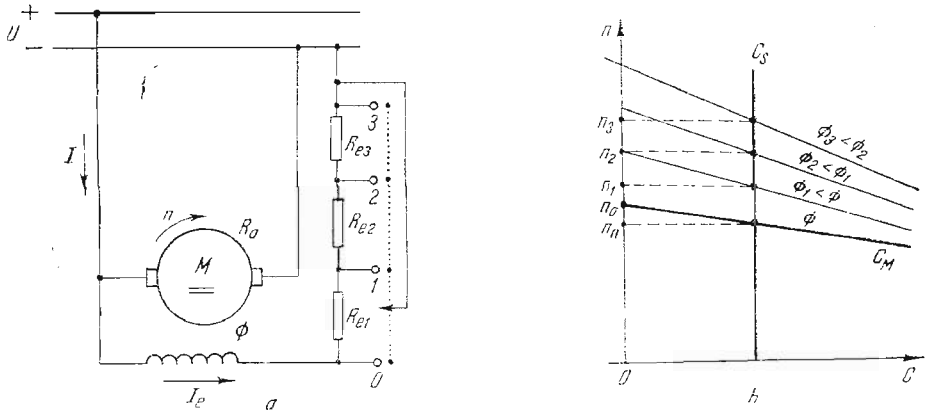


Fig. 6.25. Varierea vitezei prin modificarea fluxului de excitație:
a — schema electrică; *b* — diagrama varierii vitezei.

● **Varierea vitezei** (turației) se realizează în două moduri:

— *prin modificarea rezistenței rotorice* R_{p1}, R_{p2}, R_{p3} (fig. 6.24, *a*) caz în care turația se modifică la valorile n_1, n_2, n_3 (fig. 6.24, *b*);

— *prin modificarea curentului de excitație*, deci a fluxului de excitație Φ_1, Φ_2, Φ_3 ... (fig. 6.25, *a*) caz în care turația se modifică la valorile n_1, n_2, n_3 ... (fig. 6.25, *b*).

Motoarele de curent continuu cu excitație separată sau derivație se folosesc în general acolo unde se doresc viteze de lucru constante ca de exemplu la acționarea mașinilor-unelte, a compresoarelor, a ventilatoarelor etc. Motoa-

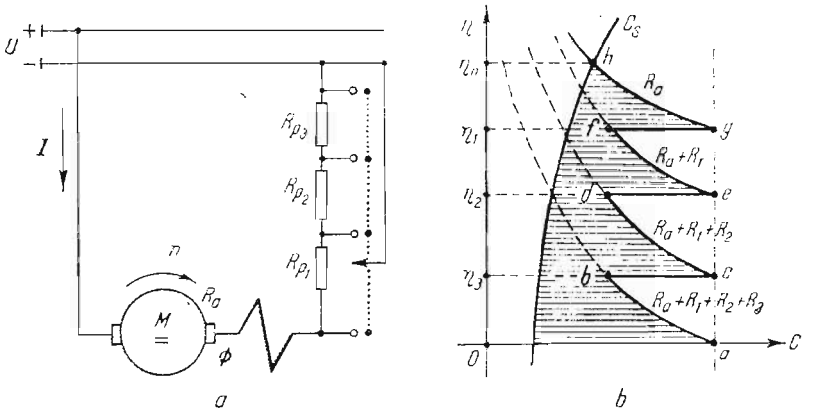


Fig. 6.26. Pornirea și varierea vitezei la motoarele de curent continuu tip serie:

a — schemă electrică; *b* — diagrama manevrării.

rele cu excitație serie se folosesc în special în tracțiunea electrică (tramvaie, troleibuze) datorită posibilităților de a avea un cuplu motor la turație mică (v. fig. 6.20); comanda acestora este însă mai dificilă.

Pornirea precum și varierea vitezei la motoarele de excitație serie se realizează tot prin introducerea în serie a unor rezistențe R_p (fig. 6.26), iar frînarea se obține prin inversarea sensului de alimentare a unei singure înfășurări — rotorice sau statorice.

Observație. Prin inversarea polarității tensiunii de alimentare se modifică sensul curentului I, dar și sensul fluxului Φ, astfel încît cuplul motor ($C_M = K_C = \Phi I$) își păstrează același sens.

D. MAȘINI SINCRONE

1. CONSTRUCȚIA MAȘINII SINCRONE

Mașinile sincrone sînt formate din următoarele părți principale: *stator rotor* și *excitatoare*.

● **Statorul** cuprinde un miez magnetic format din tole de oțel electrotehnic fixat pe o carcasă circulară (fig. 6.27, *a*) pe care este bobinat un sistem trifazat de înfășurări. Bobinajul statoric se leagă la rețeaua de curent alternativ.

● **Rotorul** (fig. 6.27, *b*) cuprinde un număr oarecare* de perechi de poli p avînd înfășurări de excitație alimentate în curent continuu de la un generator special numit *excitatoare*.

● **Excitatoarea** este plasată de obicei chiar pe același ax cu mașina sincronă, inductorul său fiind solidar cu rotorul mașinii (fig. 6.27, *b*) iar indu-

* La o pereche de poli rotorici (N — S) trebuie să corespundă un număr de trei perechi de poli statorici (rotor — p, stator — $3p$).

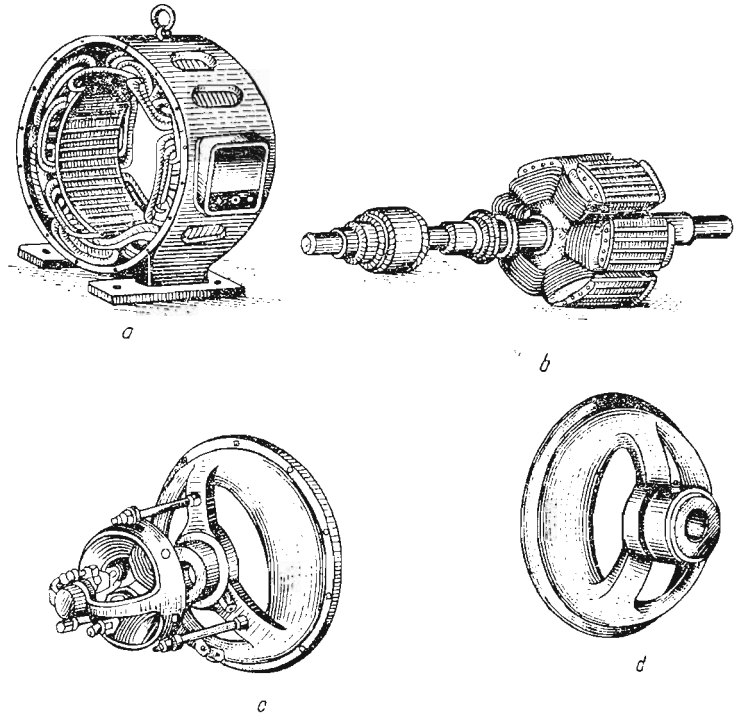


Fig. 6.27. Părțile componente ale mașinii sincrone:
a — stator; *b* — rotor; *c* — scut din față; *d* — scut din spate.

sul său (statorul) fiind montat pe scutul din față al mașinii (fig. 6.27, *c*).

Scutul din spate (fig. 6.27, *d*) împreună cu cel din față asigură centrarea rotorului.

2. GENERATORUL SINCRON

● **Funcționarea.** Bobinajul de excitație al generatorului fiind parcurs de curentul de excitație i_e (fig. 6.28), produce un cîmp magnetic (deci un flux magnetic Φ_m) fix față de rotor. Rotorul apare deci ca un magnet cu unul sau mai multe perechi de poli. Cînd rotorul se învîrtește cu turația n față de stator, el produce un cîmp magnetic învîrtitor (fluxul Φ_m învîrtitor), care induce în bobinajul trifazat statoric un sistem trifazat de tensiuni de valoare maximă E:

$$E = K_s \Phi_m \tag{6.32}$$

și de frecvență f*

$$f = \frac{pn}{60}. \tag{6.33}$$

* Dacă n este turația generatorului (rot/min), rezultă că într-o secundă rotorul va efectua $n/60$ rotații (rot/s). Într-o rotație, însă, prin fața unei înfășurări statorice trec p perechi de poli (de p ori $N - S$), deci frecvența tensiunii induse va fi de p ori mai mare:

$$f = \frac{pn}{60}.$$

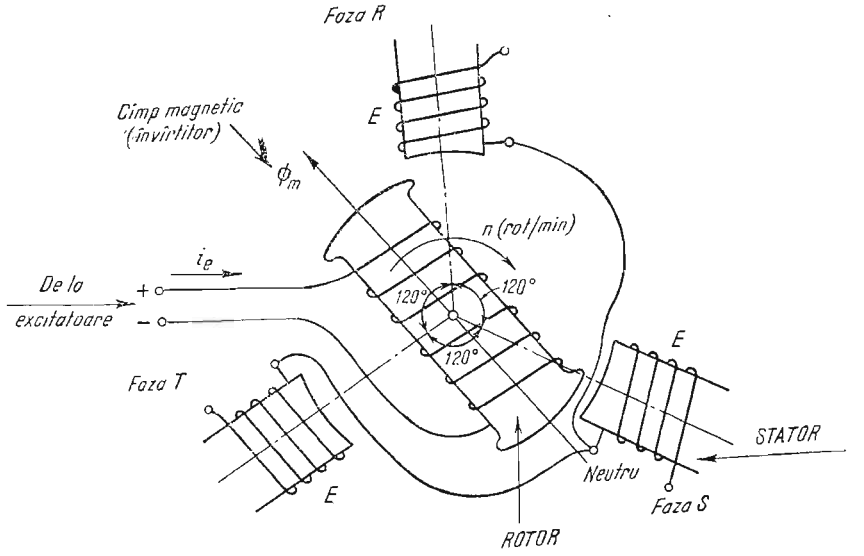


Fig. 6.28. Principiul de funcționare al generatorului sincron.

Deoarece frecvența rețelei trebuie să fie constantă ($f = 50$ Hz) rezultă că și turația generatorului sincron (n_G) trebuie să fie constantă:

$$n_G = \frac{60f}{p} = \frac{60 \times 50}{p} = \frac{3\,000}{p} \text{ rot/min.}$$

Această turație poartă numele de *turație sincronă*, sau de *sincronism*.

Observație. Deoarece numărul minim de perechi de poli este 1 ($p = 1$) rezultă că valoarea maximă a turației sincrone a generatorului este:

$$n_{G\,max} = \frac{3\,000}{1} = 3000\,[\text{rot/min}].$$

● **Acționarea generatoarelor.** Generatoarele sincrone, denumite uneori și *alternatoare*, sînt folosite pe scară largă la producerea energiei electrice în sistemele energetice naționale. Ele sînt antrenate de turbine cu abur (v. cap. V) — turbogeneratoare — sau de turbine cu apă — hidrogeneratoare.

Turbinele cu abur avînd turații mari, turbogeneratoarele se construiesc aproape exclusiv pentru turația maximă de 3 000 rot/min ($p = 1$).

De exemplu turbogeneratorul — inclusiv turbina — care se construiește în prezent în țara noastră pentru CET Rogojelu și are o putere de 330 MVA, are o singură pereche de poli (deci, turația sincronă este $n_T = 3\,000$ rot/min).

Atenție! Numărul mic de poli ai rotorului face ca diametrul turbogeneratoarelor să fie relativ mic (de exemplu diametrul rotorului turbogeneratorului de 330 MVA este de circa 1 m).

Turbinele hidraulice au turații mult mai mici, ceea ce face ca hidrogeneratoarele să fie mult mai lente.

De exemplu, hidrogeneratorul sincron de 190 MVA construit — împreună cu turbina — în țara noastră și folosit la SHEN Porțile de Fier are un număr de 42 perechi de poli ($p = 42$), deci are o turație sincronă:

$$n_H = \frac{3\,000}{42} = 71{,}4 \text{ rot/min.}$$

Atenție! Numărul mare de poli ai rotorului face ca diametrul hidrogeneratoarelor să fie foarte mare (de exemplu diametrul rotorului hidrogeneratorului de 190 MVA este de circa 15 m).

3. MOTORUL SINCRON

Constructiv, motorul sincron este la fel ca un generator sincron. Astfel, dacă un generator sincron nu mai primește cuplul de la turbină (de exemplu se închide ventilul de admisie a aburului), mașina tinde să se frîneze și curentul statoric își schimbă semnul*.

Ca urmare, mașina începe să funcționeze ca motor sincron însă își păstrează aceeași turație sincronă $\left(n_M = \frac{60f}{p}\right)$.

Atenție! Spre deosebire de mașinile de curent continuu, la care aceeași mașină în regim de generator are turația mai mare ca în regim de motor ($n_G > n_M$), la mașinile sincrone:

$$n_G = n_M$$

Caracteristica mecanică $n_M = f(C_M)$ este absolut rigidă adică reprezintă o dreaptă paralelă cu axa absciselor.

● **Sincronizarea.** O problemă dificilă la motoarele sincrone este aducerea lor la turația sincronă înainte de a fi cuplate la rețea.

Acest proces poartă numele de sincronizare, și poate fi realizat de exemplu cu un motor auxiliar de lansare.

Motoarele sincrone sînt folosite în cazurile în care se dorește obținerea unei turații (viteze de deplasare) riguros constante — de exemplu la laminoare, în industria hîrtiei etc.

E. MAȘINI ASINCRONE

1. CONSTRUCȚIA MAȘINII ASINCRONE

Mașina asincronă cuprinde două părți distincte: statorul și rotorul.

● **Statorul** este realizat la fel ca la mașina sincronă (fig. 6.29, *a*) adică sub forma unei înfășurări trifazate *1* plasate în crestăturile unui miez magnetic *3* realizat din tole de oțel electrotehnic, totul fiind introdus în carcasă circulară *2*. Pe carcasă se află placa de borne *4* la care vin cele șase capete ale înfășurărilor trifazate.

* în loc să mai fie debitat în rețea, este absorbit din rețea.

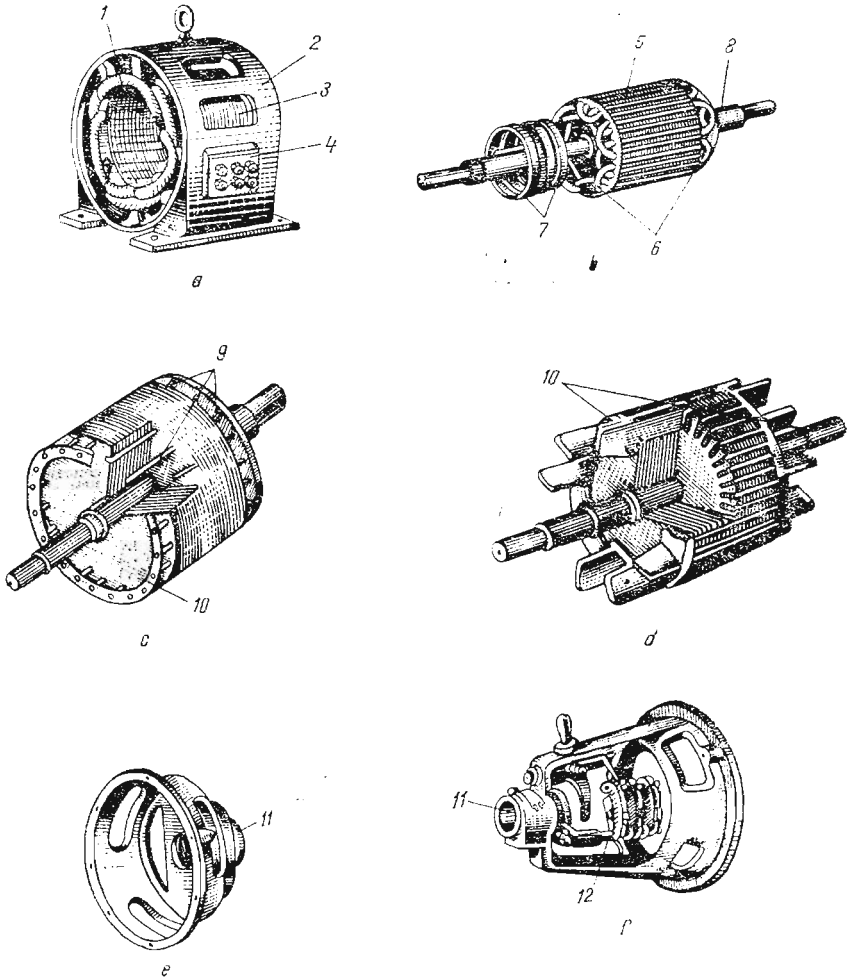


Fig. 6.29. Părțile componente ale mașinii asincrone:
a — stator; *b* — rotor bobinat; *c* — rotor în colivie cu conducte circulare; *d* — rotor în colivie cu bare înalte turnate; *e* — scut din spate; *f* — scut din față.

● **Rotorul,** spre deosebire de cel de la mașina sincronă, este în acest caz (fig. 6.29, *b*) realizat dintr-un miez magnetic *5* avînd o înfășurare rotorică trifazată *6* conectată în stea, ale cărei capete sînt legate la inelele colectoare *7*, totul fiind plasat pe axul *8*. Acesta reprezintă tipul de rotor bobinat. La rotorul în scurtcircuit, conductoarele rotorice sînt realizate sub forma unor bare longitudinale *9* realizate din conducte circulare neizolate de cupru (fig. 6.29, *c*) sau turnate sub formă de bare înalte din aluminiu * (fig. 6.29, *d*) în crestăturile rotorului. Aceste conducte neizolate sînt scurtcircuitate la

* Se numesc bare înalte deoarece înălțimea lor este mult mai mare decît lățimea, fapt care ușurează pornirea (cuplu mare și curent redus).

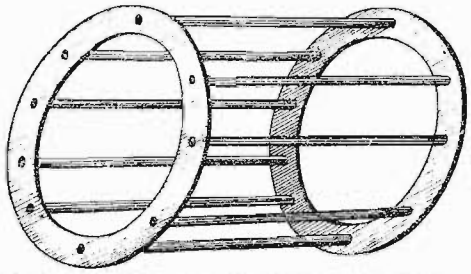


Fig. 6.30. Rotor în scurtcircuit tip colivie.

capete prin inelele de scurtcircuitare *10*. Sistemul de conductoare împreună cu inelele formează un fel de colivie, asemănătoare cu cea din figura 6.30, din care cauză mașinile asincrone cu rotor în scurtcircuit se mai numesc și cu *rotor în colivie*.

Scutul din spate (fig. 6.29, *e*) prevăzut cu lagărul *11*, precum și cel din față (fig. 6.29, *f*) care pe lîngă lagărul **11** mai este prevăzut cu trei perii *12* (ce calcă pe inelele *7*), asigură centrarea rotorului față de stator.

Atenție! Deși mașinile asincrone pot funcționa și ca generatoare, practic ele sînt folosite exclusiv ca motoare.

2. FUNCȚIONAREA MOTORULUI ASINCRON

Funcționarea motorului asincron poate fi urmărită pe figura 6.31. Cîmpul învîrtitor produs de stator prin curentul absorbit de la rețea, și care este asemănător cu cel produs în motorul sincron induce în înfășurările rotorice un sistem de tensiuni trifazate.

În funcționare, rotorul fiind legat în scurtcircuit, tensiunile induse vor da naștere unor curenți rotorici.

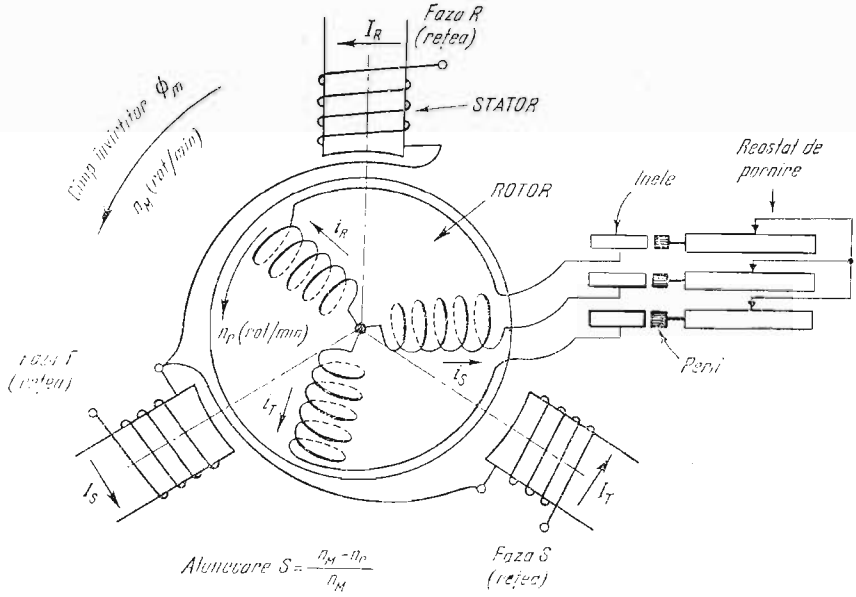


Fig. 6.31. Principiul de funcționare al motorului asincron.

Interacțiunea dintre cîmpul magnetic și curenții rotorici produce un cuplu electromagnetic care învîrtește rotorul în sensul cîmpului învîrtitor statoric (sensul succesiunii fazelor).

Cîmpul învîrtitor statoric se rotește ca și la motorul sincron cu viteza (turația) sincronă:

$$n_0 = \frac{60\,f}{p} = \frac{3\,000}{p}\ [\text{rot/min}] \tag{6.34}$$

însă rotorul se învîrtește cu o turație mai mică n_r. Se spune că rotorul *alunecă* față de stator. Turația n_M reală a rotorului se numește *turație asincronă*.

Diferența turațiilor $(n_0 - n_M)$ raportată la turația sincronă se numește *alunecare* s:

$$s = \frac{n_0 - n_M}{n_0} \times 100\ [\%]. \tag{6.35}$$

Exemplu. Un motor asincron avînd $p = 4$ și $n_M = 720$ rot/min, are:

— turația sincronă

$$n_0 = \frac{3\,000}{p} = \frac{3\,000}{4} = 720\ \text{rot/min};$$

— alunecarea:

$$s = \frac{750 - 720}{750} \times 100 = 4\ \%.$$

3. CARACTERISTICILE MOTORULUI ASINCRON

Caracteristica mecanică naturală a unui motor asincron este determinată de relația:

$$C_M = C_{max} \frac{2}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}} \tag{6.36}$$

în care: C_{max} este cuplul maxim al motorului;

s — alunecarea (relația 6.35);

s_K — alunecarea critică — adică alunecarea pentru care $C_M = C_{max}$.

Pentru

$$s = s_K \Rightarrow C_M = C_{max} \frac{2}{\frac{s_K}{s_K} + \frac{s_K}{s_K}} = C_{max}. \tag{6.37}$$

Cuplul maxim al motorului C_{max} este dat de expresia:

$$C_{max} = \frac{3\,U^2}{2X'_k} \tag{6.38}$$

în care:

U este tensiunea aplicată motorului;

X'_M — reactanța totală a motorului *.

---

* Motorul reprezintă o impedanță Z_M care are o rezistență proprie totală $R'_M = R_1 + R'_2$ și o reactanță totală $X'_M = X_1 + X'_2$ indicii *1* și *2* referindu-se la înfășurarea statorică, respectiv rotorică.

Alunecarea critică s_K este dată de expresia:

$$s_K = \frac{R'_2}{X'_M} \tag{6.39}$$

în care R'_2 reprezintă rezistența echivalentă a rotorului.

Pe baza relațiilor (6.36) ... (6.39) s-a trasat caracteristica naturală din figura 6.32 asupra căreia se pot face următoarele observații:

La pornire $n_M = 0$ deci $s = \frac{n_0 - n_M}{n_0} = 1$ iar cuplul motor are valoarea (relația 6.36):

$$C_P = C_{max} \frac{2}{\frac{1}{s_K} + s_K} = \frac{2 s_K C_{max}}{1 + s_K^2} \approx 2 s_K C_{max}. \tag{6.40}$$

Deoarece s_K [%] este relativ mic $s_K^2 \ll 1$ și se poate neglija.

La sincronism $n_M = n_0$ deci $s = \frac{n_0 - n_0}{n_0} = 0$ iar cuplul motor devine:

$$C_M = C_{max} \frac{2}{0 + \infty} = 0. \tag{6.41}$$

Punctul de funcționare f al motorului corespunde intersecției dintre caracteristica de cuplu motor C_M și o caracteristică oarecare de cuplu de sarcină C_S, diferența $C_M - C_S = C_D$ reprezentînd cuplul accelerator (haşurat în figura 6.32).

Porțiunea de caracteristică cuprinsă între punctele p (pornire) și K (critic) se numește porțiunea labilă a caracteristicii iar cea cuprinsă între punctele K, f (nominal) și n_0 (sincronism) se numește porțiunea stabilă* și practic este considerată o linie dreaptă.

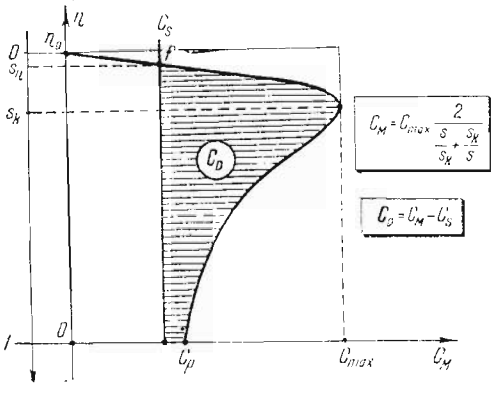


Fig. 6.32. Caracteristica naturală a motorului asincron.

Se pot obține două familii de caracteristici mecanice artificiale ale motorului asincron:

— cînd tensiunea motorului scade la valori U_1, U_2, U_3 ... ($U_n > U_1 > U_2 > U_3$) ... cuplul maxim scade proporțional cu pătratul tensiunii (relația 6.38), deci toate valorile cuplului motor C_M vor scădea corespunzător (fig. 6.33, *a*);

— cînd rezistența rotorului R' crește, alunecarea critică crește:

$$s = \frac{R'_2 + R_p}{X'_M}. \tag{6.42}$$

* Motorul nu poate funcționa stabil decît pe această porțiune.

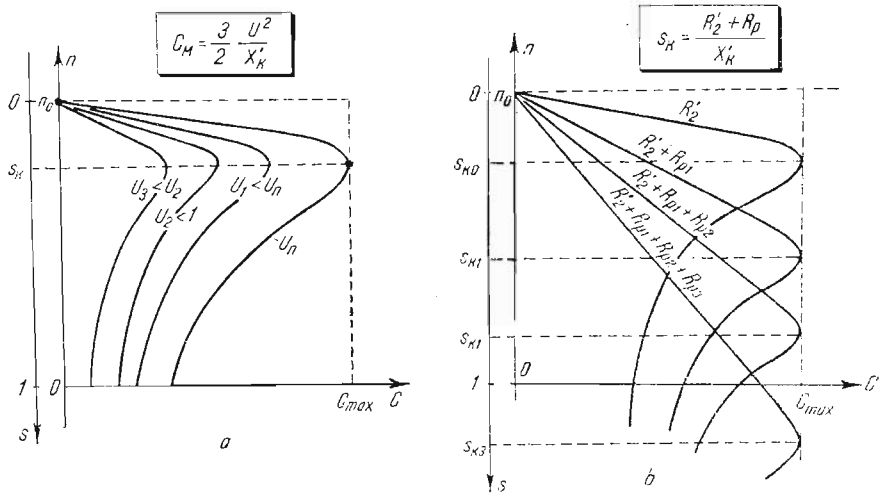


Fig. 6.33. Caracteristicile artificiale ale motorului asincron:
a — la varierea tensiunii; *b* — la varierea rezistenței rotorice.

Ca urmare pentru diverse valori ale rezistențelor R_{p1}, R_{p2}, R_{p2} ... ($R_{p1} < R_{p2} < R_{p3}$ ....) alunecările critice vor crește ($s_{K1} < s_{K2} < s_{K3}$ ...) în timp ce cuplul maxim C_{max} rămîne neschimbat [conform relației (6.38) nu depinde de valoarea rezistenței rotorice] — figura 6.33, *b*.

4. MOTORUL ASINCRON CU ROTORUL BOBINAT

Deoarece la pornire curentul absorbit este de 4 ... 8 ori mai mare decît cel nominal, motorul asincron cu rotor bobinat este prevăzut cu un reostat de pornire R_p (fig. 6.34) montat în rotor prin inelele și periile colectoare.

Reostatul este trifazat, cursoarele sale călcînd în același timp pe aceleași ploturi. La pornire reostatul se învîrtește în sensul săgeții introducînd toată

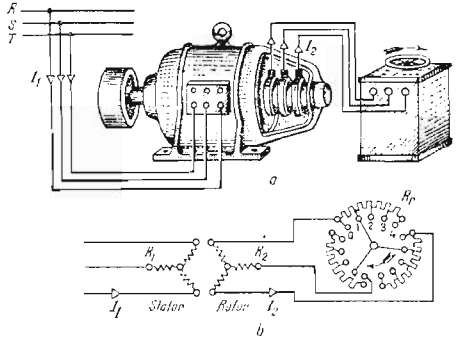


Fig. 6.34. Motor asincron cu rotor bobinat:
a — mod de legare; *b* — schema electrică.

rezistența în serie cu rotorul (ploturile *4*); apoi, pe măsură ce viteza motorului crește (I_1 și I_2 scad), rezistența respectivă se scoate treptat. În final, după circa 15 ... 20 s de la pornire, reostatul R_p fiind scos complet, capetele înfășurărilor (inelele) sînt scurtcircuitate, deci motorul funcționează ca un motor în colivie.

Rezistența R_p a reostatului de pornire are un dublu rol și anume:

— se mărește impedanța echivalentă Z_M a motorului și deci curentul absorbit la pornire I_p este mai mic [$I_p = 2 \ldots 2{,}5\ I_n$];

— se mărește alunecarea critică s_K conform relației (6.42) deci cuplul la pornire C_p are valori sporite. În adevăr, considerînd două cupluri limită de pornire C_A și C_B (fig. 6.35) — bineînțeles mai mari decît cuplul nominal C_N — pornirea se va face în trepte (ca la motorul de curent continuu) începînd cu punctul *a* avînd rezistența R_{p3} astfel aleasă încît $C_M = C_B$. Motorul se accelerează pînă în punctul *b* cînd $C_M = C_A$ și unde micșorînd rezistența de pornire de la valoarea R_{p3} la R_{p2} (alunecarea critică de la s_{K3} la s_{K2}) punctul de funcționare trece în *c* apoi face un nou salt *d-e* (de la R_{p2} la R_{p1}) și în sfîrșit ultimul salt *f-g* ($R_p = 0$) cînd se trece pe caracteristica naturală, funcționarea permanentă fiind în punctul *h* (nominal) — $C_M = C_N$ și $n_M = n_n$.

Varierea vitezei motoarelor respective se realizează de asemenea prin rezistențe R_p introduse în rotor. Din figura 6.35 se observă că dacă funcționează permanent cu rezistențele R_{p1}, R_{p2} sau R_{p3} punctele de funcționare vor fi la vitezele n_1, n_2 sau n_3 obținute la intersecția caracteristicii de cuplu motor cu cea de sarcină.

Motoarele asincrone cu rotor bobinat (cu inele) sînt folosite mai rar, fiind relativ scumpe. Ele se utilizează în locurile în care este necesară varierea în limite reduse a turației.

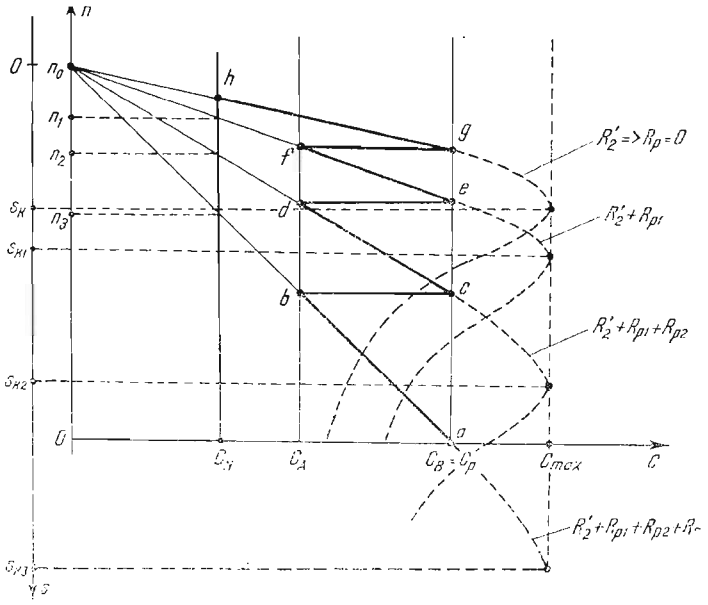


Fig. 6.35. Diagrama pornirii motorului asincron cu rotorul bobinat.

Asupra acestui tip de motor nu se poate acționa decît prin stator, întrucît nu posedă bobinaj rotoric.

Problema principală a motoarelor, și anume pornirea, este rezolvată la motoarele respective prin două categorii de metode:

— *pornire directă*;

— *pornire cu tensiune redusă*.

● **Pornirea directă** implică cuplarea directă la rețea cu ajutorul unui întreruptor (fig. 6.36). Curentul absorbit este în acest caz destul de mare ($5 \dots 7\ I_n$), însă în cîteva secunde scade la valoarea nominală. Metoda este simplă și ieftină, însă acest fel de pornire produce căderi mari de tensiune în rețea, fapt care poate perturba și alți consumatori.

La motoarele asincrone cu rotor în scurtcircuit de puteri foarte mari (de exemplu motoarele de la blumingul de tablă groasă de la Hunedoara au 5 000 kW), rotorul are o construcție specială cu bare înalte* la care pornirea este ameliorată, adică valoarea curentului absorbit inițial este de numai 2—3 ori valoarea nominală. În același timp momentul de pornire este mult mai mare decît la alte tipuri de motoare.

● **Pornirea cu tensiune redusă** asigură un curent mai mic la pornire aplicînd statorului o tensiune progresivă.

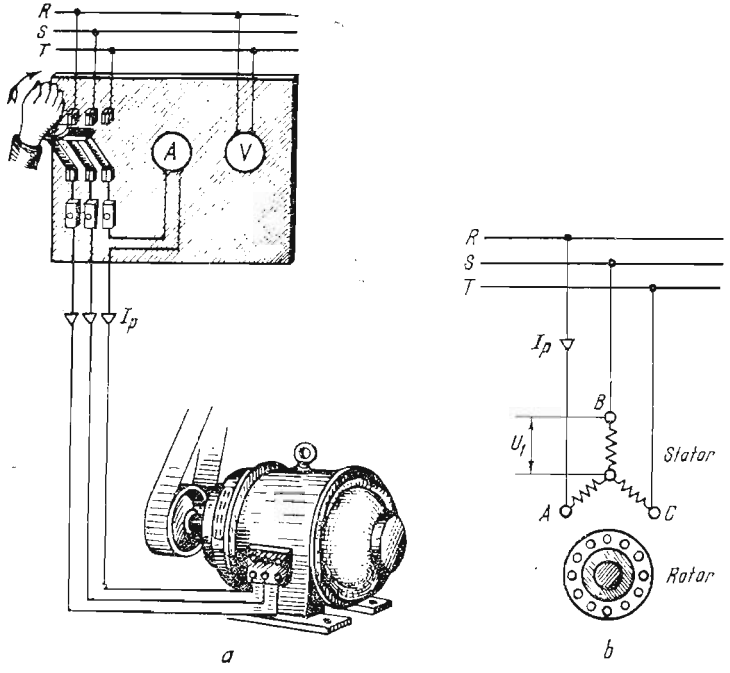


Fig. 6.36. Motor asincron cu rotorul în scurcircuit:
a — mod de legare; *b* — schema electrică.

* Bara introdusă în crestătură este înaltă adică pătrunde spre ax cu înălțime de peste 5 ori lățimea crestăturii (similar cu cele din figura 6.29, *d*, însă barele ajung pînă aproape de ax).

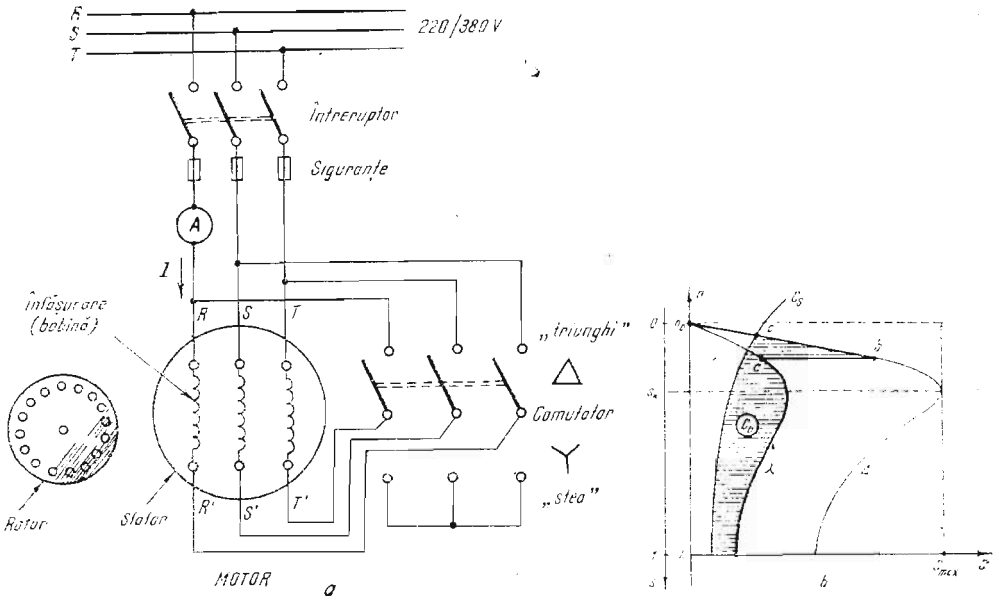


Fig. 6.37. Pornirea stea-triunghi a motorului asincron:
a — schemă electrică; *b* — diagramă de pornire

Dintre aceste metode cea mai răspîndită este pornirea stea — triunghi (fig. 6.37, *a*).

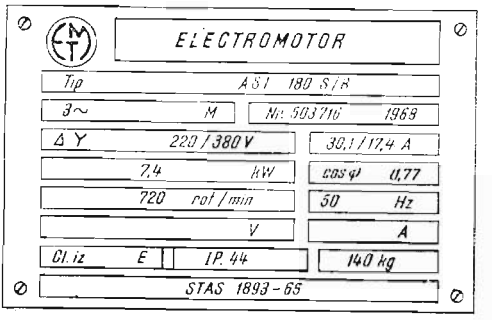
Inițial, se pornește motorul cu comutatorul în poziția stea adică tensiunea aplicată unei înfășurări a motorului este tensiunea pe fază (redusă) a rețelei (de exemplu 220 V). După ce motorul s-a accelerat și curentul său absorbit a scăzut, se trece brusc comutatorul în poziția triunghi, înfășurările motorului fiind legate în triunghi. În acest caz o înfășurare a motorului primește tensiunea între faze (380 V), adică tensiunea sa nominală.

Așadar, inițial tensiunea unei înfășurări fiind tensiunea pe fază $\left(220\ \text{V} = \frac{380\ \text{V}}{\sqrt{3}}\right)$ rezultă, în conformitate cu relațiile (6.36) și (6.38), că se pornește pe o caracteristică artificială a cuplului motor avînd valorile de trei ori mai mici $\left[\left(\frac{U}{\sqrt{3}}\right)^2\right]$ decît caracteristica naturală (fig. 6.37). Ulterior, ajungînd de exemplu în punctul *a* se efectuează comutarea stea-triunghi prin care punctul de funcționare trece în *b*, cuplul accelerator C_D crește și motorul ajunge la regim în punctul $c(C_M - C_S = C_D = 0)$.

Motoarele asincrone cu rotorul în scurtcircuit reprezintă marea majoritate a motoarelor folosite în instalațiile energetice.

Mărimile mai importante ale unui motor asincron, ca dealtfel ale oricărei mașini electrice, sînt înscrise de fabrica constructoare pe plăcuța indicatoare a mașinii (fig. 6.38).

Fig. 6.38. Exemplu de plăcuță indicatoare a unei mașini electrice.



REZUMAT

● Mașinile electrice se împart în două grupe mari și anume:

— mașini statice (fără piese în mișcare);
— mașini rotative (avînd un rotor și un stator).

● Cea mai răspîndită mașină statică este transformatorul electric, care poate fi:
— monofazat (la puteri mici);
— trifazat (la puteri mari).

Dintre transformatoare, o importanță deosebită în sistemul energetic o are transformatorul trifazat în ulei, de putere.

● Mașinile rotative se clasifică după felul curentului în:

— mașini de curent continuu;
— mașini de curent alternativ.

● Mașinile de curent continuu pot fi folosite ca:

— generator (dinam);
— motor.

După modul de alimentare ale înfășurării de excitație (inductor) se deosebesc:
— cu excitație separată;
— cu autoexcitație (serie, derivație și mixtă).

● Cele mai răspîndite mașini de curent alternativ sînt cele trifazate care se împart în:

— sincrone;
— asincrone.

● Mașinile sincrone sînt folosite în special ca generatoare (practic, sistemul energetic național folosește numai generatoare sincrone), dar și ca motoare.

● Mașinile asincrone sînt folosite exclusiv ca motoare:

— cu rotorul bobinat;
— cu rotorul în scurcircuit (în colivie).

● Mașinile electrice rotative stau la baza acționărilor electrice a diverselor sarcini (mașini-unelte, compresoare etc.).

VERIFICAREA CUNOȘTINȚELOR

1. Transformatorul este o mașină electrică statică care asigură (față de primar):
   a — modificarea tensiunii (curentului) în secundar?
   b — modificarea frecvenței în secundar?
   c — creșterea puterii în secundar?
2. Generatorul de curent continuu produce la bornele înfășurării rotorice (perii) o tensiune:
   a — continuă?
   b — alternativă?
   c — pulsatorie?
3. În motorul de curent continuu tensiunea electromotoare indusă (E) este:
   a — mai mare ca tensiunea rețelei (U)?
   b — mai mică ca tensiunea rețelei?
   c — egală cu tensiunea rețelei?
4. Mașina de curent continuu tip derivație se numește astfel deoarece:
   a — indusul se leagă în derivație la rețea?
   b — inductorul se leagă în derivație cu indusul?
   c — reostatul de excitație se leagă în derivație pe inductor?
5. Aceeași mașină de curent continuu funcționînd ca generator are turația (n_G) față de turația (n_M) funcționînd ca motor:
   a — mai mare ($n_G > n_M$)?
   b — mai mică ($n_G < n_M$)?
   c — egală ($n_G = n_M$)?
6. Aceeași mașină sincronă funcționînd ca generator are turația (n_G) față de turația (n_M) funcționînd ca motor:
   a — mai mare ($n_G > n_M$)?
   b — mai mică ($n_G < n_M$)?
   c — egală ($n_G = n_M$)?
7. Introducerea rezistențelor în rotor la motoarele asincrone cu rotor bobinat asigură:
   a — mărirea cuplului maxim?
   b — mărirea cuplului de pornire?
   c — mărirea curentului absorbit la pornire?

CAPITOLUL 7

APARATE ELECTRICE DE ÎNALTĂ ȘI JOASĂ TENSIUNE

A. NOȚIUNI GENERALE

S-a arătat în capitolul 5 că, în sistemul energetic, energia electrică străbate un anumit circuit, de la surse (generatoare) la consumatori (motoare, cuptoare, lămpi etc.).

Pentru ca acest circuit să funcționeze în bune condiții și în conformitate cu cerințele de producție impuse de om, sînt necesare o serie de obiecte (utilaje) electrotehnice, de construcții mai simple sau mai complexe, numite aparate electrice.

OBIECTE ELECTROTEHNICE =
= GENERATOARE + RECEPTOARE + APARATE ELECTRICE

După tensiunea la care sînt folosite, aparatele se clasifică în următoarele categorii:

— aparate electrice de înaltă tensiune (peste 1 000 V);

— aparate electrice de joasă tensiune (sub 1 000 V).

Independent de tipul aparatului și de tensiunea pentru care sînt destinate, aparatele electrice au rolul de a stabili sau întrerupe un circuit parcurs de curent. Așadar, aparatele electrice de înaltă și joasă tensiune trebuie să suporte:

— *în regim normal* — curenții nominali (normali), într-un interval de timp oricît de mare;

— *în regim de suprasarcină* — curenți cu suprasarcină ce depășesc cu 10% ... 60% curenții nominali un timp relativ redus, de exemplu 2 ... 60 min;

— *în regim de avarie* — curenții de scurtcircuit (I_{sc}) ce pot atinge valori de 5 ... 25 de ori curentul nominal (I_n), însă un timp foarte redus, de exemplu 1 ... 5 s.

Datorită curenților ce le parcurg, aparatele suportă două feluri de solicitări:

— *mecanice* — datorate forțelor electrodinamice ce iau naștere între conductoarele, bobinajele etc. ale aparatelor parcurse de curent — v. cap. 3 — forțe care sînt proporționale cu I^2. De exemplu dacă $I_{sc} = 20 \times I_n$ solicitările electrodinamice sînt de 400 ori (20^2) mai mari decît în regim normal;

— *termice* — datorate rezistențelor conductoare și ale contactelor electrice* curentul produce o încălzire prin efect Joule-Lenz care prin ridicarea temperaturii solicită izolația aparatului din punct de vedere al încălzirii.

Solicitările respective sînt de asemenea proporționale cu I^2 conform legii lui Joule-Lenz (v. cap. 3). Pe de altă parte însă deoarece cantitatea de căldură Q este proporțională și cu timpul t cît curentul străbate circuitul ($Q = RI^2t$) rezultă că pentru ca temperatura izolației să nu depășească o valoare periculoasă este necesar ca, cu cît curentul de scurtcircuit este mai mare, cu atît timpul admis pentru întreruperea circuitului („timpul de protecție") să fie mai scurt.

B. APARATE ELECTRICE DE ÎNALTĂ TENSIUNE

1. SEPARATOARE

Separatoarele sînt aparate de închidere-deschidere (conectare-deconectare) a circuitelor electrice sub tensiune, dar care nu sînt parcurse de curent, separarea fiind vizibilă și cu izolație destul de mare pentru ca pe circuitul deconectat personalul de întreținere să poată executa lucrări în deplină siguranță.

● **Construcție.** Separatoarele sînt realizate de obicei sub forma din figura 7.1, în care un cadru de susținere *1*, avînd doi izolatori suport *2*, cuprinde contactele fixe *4* și *4'* și cuțitul de contact mobil *6*. Separatorul poate fi deschis acționînd de urechea *5* a contactului mobil, astfel încît circuitul electric racordat prin bornele *3* și *3'* este separat vizibil.

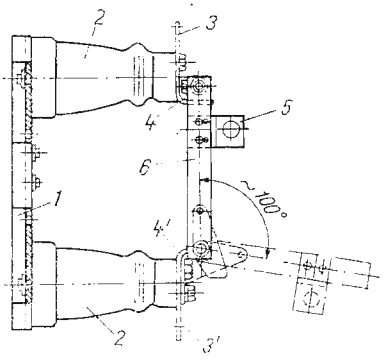


Fig. 7.1. Separator monopolar de interior 10 kV, 400 A, acționat manual.

Borna *7* de legare la masă asigură protecția personalului împotriva „tensiunilor de atingere" (v. cap. 13).

Separatoarele pot fi acționate (manevrate) fie manual, cu ajutorul unei manete izolante, fie pneumatic folosind un „servomotor pneumatic" alimentat cu aer comprimat. Un asemenea servomotor poate fi comandat electric, practic de la orice distanță.

Exemplul 1. În figura 7.1 se prezintă un separator monopolar de interior, 10 kV, 400 A, acționat manual.

Exemplul 2. În figura 7.2 (*a* — vedere laterală; *b* — vedere de sus), se prezintă un separator tripolar, de exterior, 220 kV, 600 A, tip rotativ cu acționare pneumatică. Izolatoarele *1* și *2* se rotesc datorită ser-

* Datorită imperfecțiunii suprafețelor precum și a impurităților în punctele de îmbinare sau atingere a două conductoare apare o rezistență ohmică de contact în care se produce o degajare de căldură prin efect Joule-Lenz.

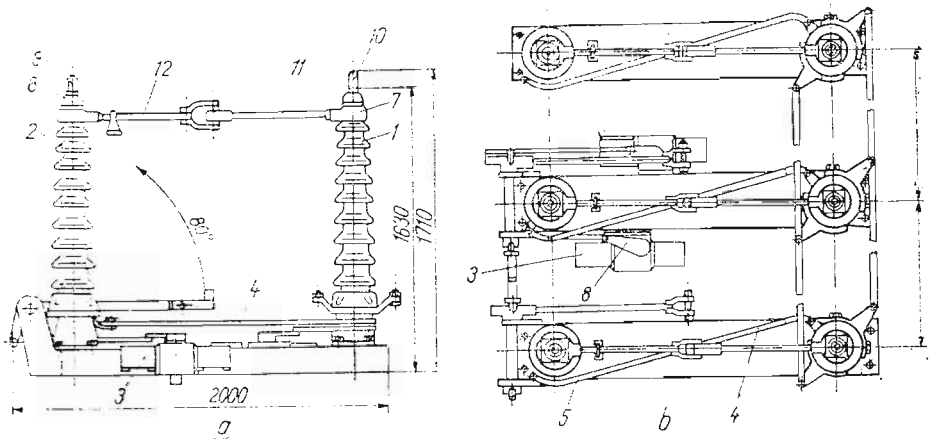


Fig. 7.2. Separator tripolar de exterior 220 kV, 600 A tip rotativ cu acționare pneumatică: *a* — vedere laterală; *b* — vedere de sus.

zomotorului pneumatic *3*, care acționează prin pirghiile *4* și *5* și maneta *6*. În interiorul pieselor („cape") *7* și *8* există contacte alunecătoare care asigură legătura între bornele de circuit *9* și *10* prin brațele mobile *11* și *12*.

2. ÎNTRERUPTOARE

Întreruptoarele sînt aparate de închidere-deschidere a circuitelor de înaltă tensiune însă, spre deosebire de separatoare, ele acționează sub curent atît în condiții normale de lucru, cînd circuitul este străbătut de curentul nominal, cît și la defecte, cînd circuitul este străbătut de curenți de scurtcircuit.

Întreruptoarele execută operația de închidere sau deschidere fie la comanda unui operator uman, fie în mod automat, la comanda unor dispozitive speciale. Din această cauză ele se mai numesc și întreruptoare automate de înaltă tensiune.

Întreruptoarele sînt caracterizate și printr-o mărime numită *putere de rupere* S_r, care reprezintă puterea maximă trifazată pe care o poate deschide („rupe") întreruptorul la curentul de scurtcircuit I_{sc} (kA) și la tensiunea nominală U_n (kV), fără ca el să se deterioreze:

$$S_r = \sqrt{3} U_n I_{sc} \text{ [MVA]}.$$

Pentru ca întreruptoarele să poată „rupe" curenți mari, este necesară folosirea unui „mediu de stingere" (ulei, aer comprimat etc.). Acesta este mediul material în care se deschid contactele întreruptorului care rup curentul de scurtcircuit și unde ia naștere un „arc electric" ca acela ce se formează la sudarea electrică. Mediul de stingere este acela care, printr-o deplasare rapidă între contacte, „suflă" și stinge arcul electric.

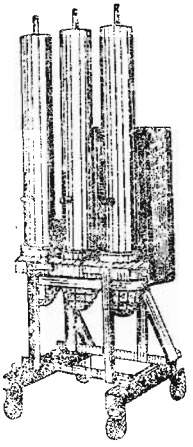


Fig. 7.3. Întreruptor cu ulei puțin, de tip interior.

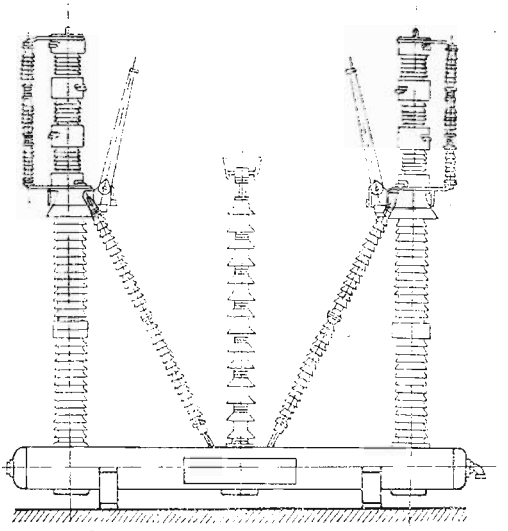


Fig. 7.4. Întreruptor cu aer comprimat, tip exterior.

Exemplul 1. În figura 7.3 se prezintă un întreruptor cu ulei puțin, 20 kV, 1 250 A, 500 MVA, de tip interior.

Exemplul 2. În figura 7.4 se prezintă un întreruptor cu aer comprimat, 220 kV, 800 A, 15 000 MVA, de tip exterior.

3. SIGURANȚE FUZIBILE DE ÎNALTA TENSIUNE

După cum le arată și numele, siguranțele sînt fuzibile, adică „se topesc" la trecerea curenților de scurtcircuit, astfel că întrerup circuitul parcurs de curent. Se spune că siguranțele au rolul de „protecție", adică de apărare (protejare) a instalației electrice împotriva efectelor produse de scurtcircuite.

Siguranțele fuzibile se folosesc în general în instalații de 6 ... 35 kV și foarte rar la 110 kV, avînd o putere de rupere redusă (circa 10 MVA). Domeniile lor de aplicare sînt următoarele:

— protecția transformatoarelor cu puteri de pînă la 1 000 kVA;
— protecția motoarelor de înaltă tensiune (3 ... 6 kV);
— protecția liniilor de 15 ... 20 kV de importanță mică (electrificări rurale).

4. DESCĂRCĂTOARE

Una dintre mărimile specifice unui aparat sau unei instalații electrice este tensiunea nominală U_n, față de care în funcționare normală tensiunile reale sau de serviciu nu pot avea valori mai mari sau mai mici decît în anumite limite admisibile (5 ... 15%).

În exploatare însă, pot apărea creșteri de tensiune ce depășesc cu mult valoarea de serviciu maximă admisibilă, datorită unor sarcini suplimentare ce se acumulează pe capacitățile liniilor aeriene sau cablurilor $\left(U = \frac{Q}{C} - \text{v.cap. 1}\right)$.

Aceste creșteri de tensiune, numite *supratensiuni*, sînt periculoase prin faptul că pot provoca distrugerea izolației, determinînd uneori deteriorări grave, cum ar fi „arderea" transformatoarelor.

Descărcătoarele sînt aparate folosite în protecția împotriva supratensiunilor și care asigură scurgerea la pămînt a sarcinilor electrice care au produs supratensiunea (v. cap. I).

În acest mod, tensiunea normală este restabilită fără a fi nevoie ca alimentarea liniei să fie întreruptă. În cazul unui descărcător tubular, arcul electric ce se scurge la pămînt se formează în interiorul unui tub în care arcul este „sulfat" printr-o degajare de gaze. În cazul unui descărcător cu rezistență variabilă (fig. 7.5) în afara spațiului de rupere *1* aflat în interiorul unui izolator *2* se montează în serie o rezistență *3* formată din carbură de siliciu (carborund), care are proprietatea că la creșterea curentului de descărcare rezistența internă a aparatului crește. Acest fapt asigură restabilirea rapidă a tensiunii normale. Borna *4* este legată la linia protejată, iar borna *5* se leagă la pămînt.

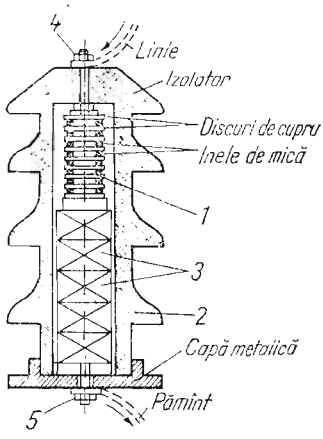


Fig. 7.5. Descărcător cu rezistență variabilă.

Notă. Tot în categoria aparatelor de înaltă tensiune se încadrează și transformatoarele de măsură (de curent și de tensiune) care însă pentru o mai bună înțelegere au fost tratate în capitolul VIII (Măsurări electrice).

În țara noastră aparatele electrice de înaltă tensiune se fabrică în principal la Întreprinderea Electroputere-Craiova.

C. APARATE ELECTRICE DE JOASĂ TENSIUNE

Prin noțiunea generală de aparat electric de joasă tensiune se pot defini un număr foarte mare de elemenete, foarte diferite între ele atît ca domeniu de folosire, cît și ca mod de construcție sau grad de complexitate. Din această cauză o clasificare precisă este greu de făcut, singurul criteriu de deosebire fiind acela al funcțiilor pe care aceste aparate le au în instalațiile electrice industriale. Astfel sînt:

— *aparate de conectare manuală și comandă manuală a mașinilor electrice;*
— *aparate de conectare automată și comandă automată a mașinilor electrice;*
— *aparate auxiliare pentru acționări industriale;*
— *aparate de protecție.*

1. APARATE DE CONECTARE MANUALĂ ȘI COMANDĂ MANUALĂ A MAȘINILOR ELECTRICE

a. Întreruptoare pîrghie

Întreruptoarele pîrghie, numite uneori și *hebluri,* sînt aparate de joasă tensiune, la care închiderea și deschiderea circuitului se face cu ajutorul unui contact mobil în formă de braț de pîrghie (ca la separatorul cu cuțite).

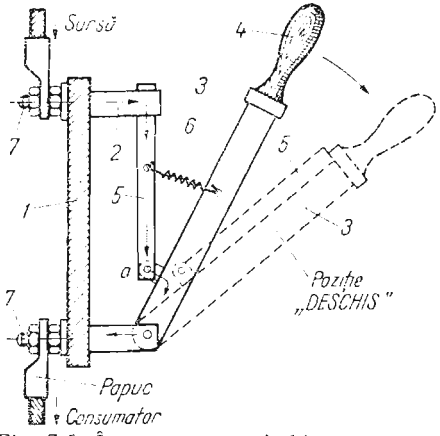


Fig. 7.6. Întreruptor cu pîrghie, monopolar.

În figura 7.6 se prezintă schematic un întreruptor cu pîrghie monopolar. Pe o placă de bază *1* sînt montate contactul fix *2* și contactul mobil *3* (pîrghia), prevăzut cu mînerul izolant de acționare *4*. Contactul de rupere *5* este o lamă metalică ce oscilează față de pîrghia *3*, în jurul punctului *a*, fiind legat de pîrghia respectivă și prin resortul *6*; astfel, în timpul manevrei de deschidere a întreruptorului, resortul *6* se întinde, asigurînd o „rupere" bruscă a circuitului electric prin lama *5*, care pentru un moment rămăsese încă strînsă în contactul fix *2*. Prin bornele *7* se asigură legătura electrică a întreruptorului la rețea.

Întreruptorul pîrghie se construiește pentru curenți de 25 ... 1 000 A și tensiune de 500 V și este folosit ca aparat de interior. La folosirea în exterior, mai ales pe șantiere el trebuie închis cu un capac de protecție.

Atenție! Montarea corectă a întreruptoarelor cu pîrghie trebuie făcută ca în figura 7.6, adică:

— cuțitele sînt în poziție verticală;

— în stare deschisă contactul mobil să nu fie sub tensiune, deci să se lege spre consumator;

— deschiderea să se facă de la partea de sus.

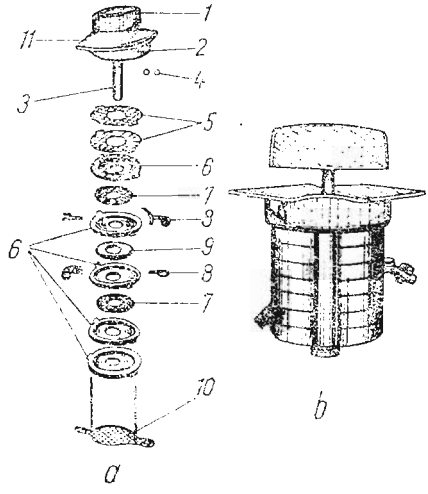


Fig. 7.7. Comutator pachet:

a — elemente componente; *b* — comutator asamblat; *1* — manetă de acționare; *2* — mecanism de sacadare; *3* — ax pătrat de acționare a contactelor mobile; *4* — piulițe și rondele de asamblare; *5* — discuri din pertinax; *6* — discuri din bachelită sau melamină (susțin contactele fixe); *7* — contact mobil în formă de T; *8* — diferite forme de contacte fixe; *9* — contact mobil în formă de 1 (în opoziție); *10* — placă de bază; *11* — placă de fixare pe panou.

Din punct de vedere constructiv întreruptoarele pîrghie pot fi: *monopolare* (în circuite de putere mică), *bipolare* (în circuite de curent continuu) sau *tripolare* (în circuite de curent alternativ trifazate).

b. Întreruptoare pachet

Întreruptoarele (comutatoarele) pachet sînt aparate obținute prin înșirarea pe același ax a unui număr variabil de elemente de conectare (pachet) (fig. 7.7). Prin rotirea manetei de acționare cele 4 ... 8 pachete se rotesc în diverse poziții, stabilind anumite circuite (contacte) și deschizînd alte circuite.

Exemplu. În figura 7.8 se prezintă schema de folosire a unui întreruptor (comutator) pachet pentru măsurarea tensiunilor pe faze și între faze la o rețea trifazată utilizînd trei voltmetre și un comutator cu trei poziții:

— poziția *0*;

— poziția *1* — măsurarea tensiunii pe faze (Y);

— poziția *2* — măsurarea tensiunii între faze (Δ).

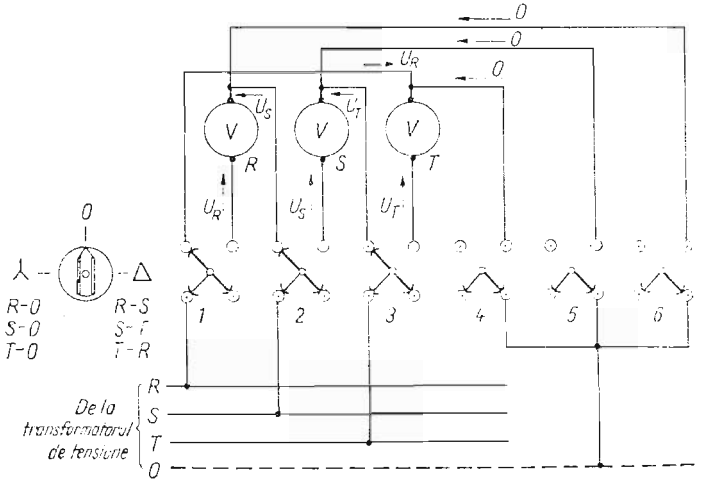


Fig. 7.8. Exemplu de folosire a comutatorului pachet pentru măsurarea tensiunii trifazate.

c. **Prize și fișe industriale**

Pentru conectarea la rețeaua electrică de joasă tensiune a unor consumatori mobili, cum ar fi: grupuri de sudură, mașini de găurit și polizat, ferăstraie electrice etc. se utilizează prize și fișe industriale (fig. 7.9). Ele au rolul de a întrerupe circuitul fără curent (ca la separatoarele de înaltă tensiune), întreruperea sarcinii în regim normal sau deschiderea la scurtcircuit fiind asigurate printr-un întreruptor automat, contactor sau siguranță fuzibilă.

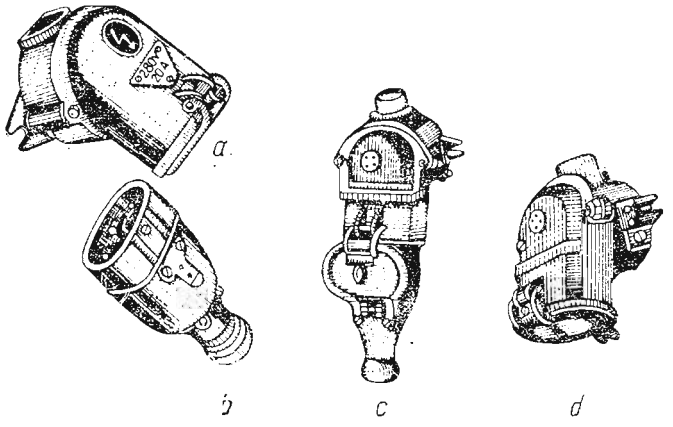


Fig. 7.9. Prize și fișe industriale:
a — priză de 25 *A*; *b* — fișă de 25 A; *c* — priză și fișă de 60 A, cuplate; *d* — priză de 60 A cu capacul închis.

● **Priza** reprezintă partea fixă legată la rețea și cuprinde părțile conducătoare de curent, izolate prin porțelan față de masă, și o carcasă protectoare din fontă sau aluminiu prevăzută cu capac cu arc care acoperă piesele sub tensiune atunci cînd fișa este scoasă (fig. 7.9, *a* și *d*).

● **Fișa** reprezintă partea mobilă la care este legată conducta flexibilă de alimentare a consumatorului mobil (fig. 7.9, *b*) și cuprinde, ca și priza, căi conducătoare de curent sub forma unor știfturi (picioruțe) de contact izolate în porțelan și protejate într-o carcasă metalică care permite îmbinarea sigură cu priza (fig. 7.9, *c*).

Prizele și fișele industriale sînt de obicei trifazate, însă au patru căi de curent, cea de a patra fiind folosită pentru legarea masei aparatului mobil la neutrul rețelei (legătura de protecție — v. cap. XIII).

Știftul de contact corespunzînd firului neutru este mai lung, astfel ca el să stabilească întîi contactul.

Atenție! Deși ansamblul fișă-priză are în zona de îmbinare o formă ovală simetrică datorită plasării nesimetrice a orificiilor și deci a știfturilor, introducerea fișei în priză nu poate fi făcută decît într-o singură poziție și anume în cea corectă.

d. Comutatoare stea-triunghi

Aceste aparate sînt folosite pentru pornirea-oprirea motoarelor asincrone cu rotor în scurtcircuit și au rolul de a reduce valoarea curentului absorbit în timpul pornirii (v. fig. 6.37).

Constructiv, comutatorul stea-triunghi este realizat de obicei sub forma unui întreruptor pachet (fig. 7.7) cu un număr de pachete și o schemă a contactelor adecvată. Astfel (fig. 7.10):

— în poziția „zero" nici un contact mobil nu se află în legătură cu contactele fixe, bornele *R*, *S* și *T* fiind sub tensiune de la rețea (fig. 7.10, *a*);

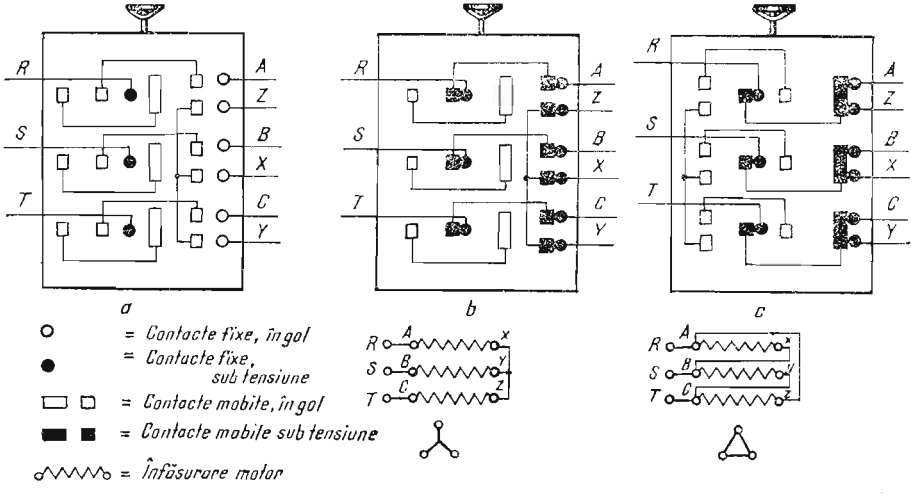


Fig. 7.10. Conexiunile la un comutator stea-triunghi:
a — poziția „zero" (întrerupt); *b* — poziția „stea" (pornire); *c* — poziția „triunghi" (funcționare).

— în poziția „stea", prin intermediul contactelor mobile se leagă R cu A, S cu B și T cu C, iar bornele X, Y și Z se leagă între ele, realizînd steaua și motorul pornește (fig. 7.10, *b*);

— în poziția „triunghi", se leagă bornele R cu A și Z, S cu B și X, T cu C și Y, realizînd conectarea motorului în triunghi și legarea lui la rețea (fig. 7.10, *c*).

Observație. La conectarea în stea o înfășurare a motorului primește tensiunea de fază a rețelei (220 V), în timp ce la conectarea în triunghi o înfășurare primește tensiunea între faze (380 V).

e. Controlere

În cazul unor tipuri de acționări — de exemplu în tracțiune — utilizînd motoare electrice (pornire, oprire, varierea vitezei, inversarea sensului de rotație, frînare electrică etc.) sînt folosite *controlerele* (v. cap. VI). Acestea sînt aparate de conectare care modifică într-o ordine stabilită conexiunea unor circuite. Controlerele sînt acționate de obicei printr-o manivelă.

Un exemplu de controler este acela întîlnit la tramvai pentru pornirea și modificarea vitezei acestuia. Tramvaiele au două motoare de curent continuu M_1 și M_2 care, cu ajutorul controlerului, sînt conectate ca în figura 7.11;

— în poziția 0 motoarele nu sînt alimentate;

— în pozițiile *1*, *2* și *3* („plusul" aplicat la bornele *1*, *2* și *3*) motoarele sînt conectate în serie și alimentate succesiv prin rezistențele de pornire R_1, R_2 și R_3 (fig. 7.11, *a*);

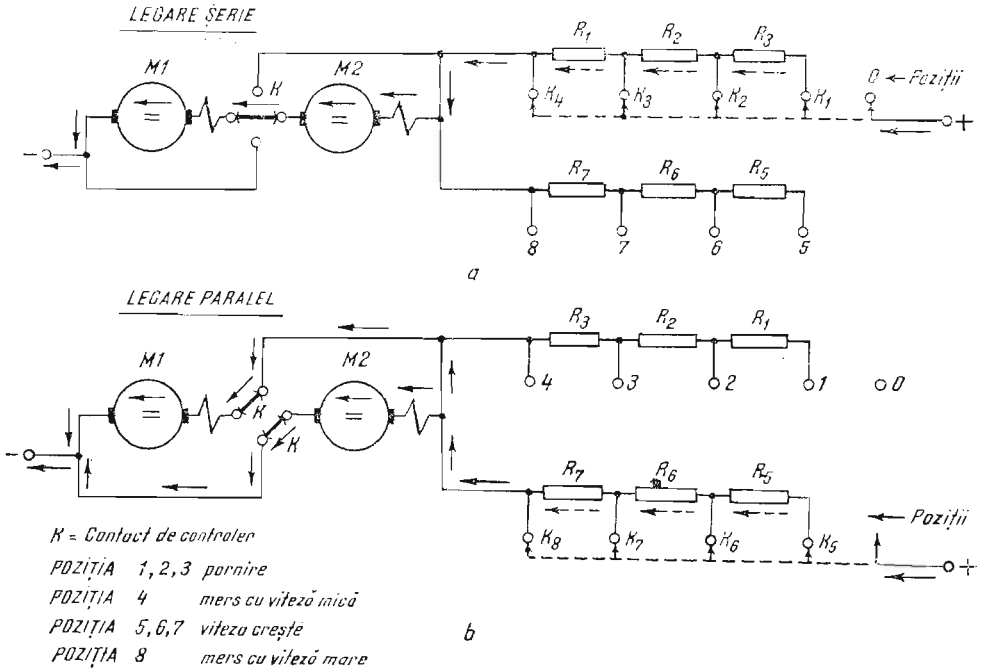


Fig. 7.11. Exemplu de folosire a controlerului la tramvaie:
a — comanda pe pozițiile *1*, *2*, *3* și *4*; *b* — comanda pe pozițiile *5*, *6*, *7* și *8*.

— în poziția *4* (plusul aplicat direct la borna *4*), motoarele sînt conectate tot în serie, însă primesc întreaga tensiune a rețelei, fără rezistențe suplimentare. Aceasta este o poziție stabilă de mers, în care viteza tramvaiului este mai mică, însă cuplul (forța) său este maxim, curentul absorbit fiind maxim*;

— în pozițiile *5*, *6* și *7* (plusul aplicat la bornele *5*, *6* și *7*) motoarele sînt conectate în paralel și alimentate succesiv prin rezistențele R_5, R_6 și R_7, astfel, că viteza crește (fig. 7.11, *b*);

— în poziția *8* (plusul aplicat direct bornei *8*) motoarele sînt conectate tot în paralel, însă primesc tensiunea maximă, viteza tramvaiului fiind maximă.

Observație. Așa cum rezultă din cele de mai sus și cum se poate constata și în practică, manipulanții de tramvaie folosesc controlerul pe pozițiile *1*, *2*, *3*, *5*, *6* și *7* numai pentru scurt timp, în regim de pornire și oprire, și folosesc pentru regim de durată numai poziția *4* (la viteză mică și în pantă) și poziția *8* (la viteză mare), adică fără rezistențe în circuitul motoarelor.

2. APARATE DE CONECTARE AUTOMATĂ ȘI COMANDĂ AUTOMATĂ A MAȘINILOR ELECTRICE

a. Contactoare

Sînt aparate care servesc pentru stabilirea, întreruperea sau comutarea unor circuite, deplasarea contactelor mobile ale acestora fiind făcută nu prin forța musculară, ci prin forța unui electromagnet.

Pe placa izolantă (fig. 7.12, *a*) se află contactul fix *2*, contactul mobil *3* fiind solidar cu armătura mobilă *4* a electromagnetului *5*. Contactul mobil este legat prin racordul flexibil *6* la borna de ieșire *7*. Resortul elicoidal *8* menține îndepărtată armătura electromagnetului deci contactul electric este deschis.

Alimentînd cu tensiunea *U* bobina *9* a electromagnetului, armătura acestuia este atrasă, deci contactul se închide.

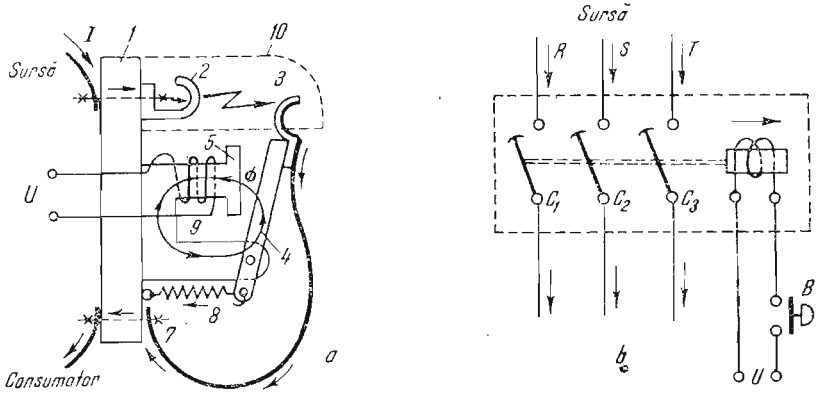


Fig. 7.12. Contactor tripolar:
a — schema constructivă; *b* — schema electrică.

* Motoarele sînt cu excitație serie (v. cap. VI).

Pentru a se evita trecerea arcului electric la fazele vecine, fiecare contact are în jurul său o cutie din material izolant *10*, numită *cameră de stingere*.

Schema electrică a unui contactor tripolar este arătată în figura 7.12, *b*.

Se constată că prin apăsarea pe butonul *B* „circuitul de comandă" este alimentat și electromagnetul atrăgînd armătura sa mobilă își închide contactele C_1, C_2 și C_3.

Observație. Faptul că contactoarele sînt acționate electric face posibilă comanda acestora de la distanță, precum și introducerea lor într-o schemă de automatizare.

Exemplu. Contactul *B* (butonul) din figura 7.12, *b* în loc să fie acționat de către om este închis de către un element de automatizare — de exemplu de un releu de nivel (v. cap. 12), caz în care contactul este comandat „automat" (de unde și denumirea respectivă).

b. Întreruptoare automate

Principial, întreruptoarele automate sînt asemănătoare contactoarelor însă spre deosebire de acestea care sînt destinate să întrerupă curenții nominali sau de suprasarcină *, întreruptoarele deschid (declanșează) și curenți de scurtcircuit. Din acest motiv întreruptorul este prevăzut pe lîngă releele termice și cu relee electromagnetice care comandă declanșarea întreruptorului la scurtcircuite; așadar în serie, pe circuit cu întreruptorul nu se mai montează siguranțe fuzibile.

Din punct de vedere al sistemului de comandă, se deosebesc două tipuri de întreruptoare de joasă tensiune:

— *cu reținere electrică* la care întreruptorul este prevăzut cu o singură bobină (ca la contactor) și acesta stă închis atîta timp cît bobina este excitată;

— *cu reținere electromagnetică* (*mecanică*) la care întreruptorul este prevăzut cu două bobine: una de anclanșare (închidere) care produce închiderea întreruptorului la un „impuls de comandă" — excitare — a acesteia întreruptorul rămînînd zăvorît (blocat) în poziția închis și o bobină de declanșare (deschidere) care similar produce deschiderea întreruptorului.

Exemplu. În figura 7.13 este prezentată schema de legare a unui motor trifazat printr-un întreruptor automat tripolar cu reținere mecanică. Funcționarea are loc în felul următor:

Apăsînd pe butonul de închidere *BI* se întregește circuitul electric al bobinei de închidere *b* din întreruptorul *I* care astfel este alimentată de la rețea prin fazele *S* și *T*. Prin excitarea bobinei *b* este comandată închiderea contactelor C_1, C_2 și C_3 ale întreruptorului *I*, axul întreruptorului fiind blocat în poziția „închis" prin zăvorul *z* care este împins în sus de către arcul elicoidal *a*.

În cazul unei suprasarcini a motorului, adică în cazul creșterii curentului *I* cu circa 10 ... 30% releele termice R_1, R_2 sau R_3 acționează asupra zăvorului *z* trăgîndu-l în jos; de asemenea, același zăvor este tras în jos de către releele electromagnetice E_1, E_2 sau E_3 în cazul unui scurtcircuit în motor, cînd curentul *I* crește la valori de 2 ... 4 I_n.

---

* Contactoarele sînt prevăzute uneori cu „relee termice" (cu bimetal) care comandă deschiderea acestora la curenți de suprasarcină.

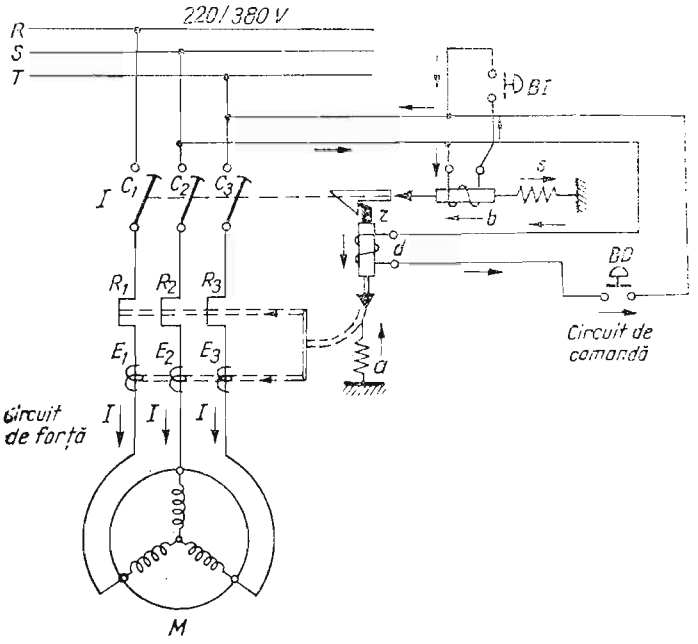


Fig. 7.13. Exemplu de folosire a unui întreruptor trifazat cu reținere mecanică.

În sfîrșit, zăvorul *z* poate fi tras în jos de către bobina de declanșare *d* care este alimentată prin butonul de deschidere *BD*. În toate cazurile, tragerea în jos a zăvorului *z* deblochează axul principal care, sub influența arcului elicoidal *s*, produce deschiderea întreruptorului și deci oprirea motorului.

3. SIGURANȚE FUZIBILE DE JOASĂ TENSIUNE

Ca și siguranțele de înaltă tensiune, și cele de joasă tensiune conțin un element fuzibil realizat sub forma unei platbande (la curenți mari) sau a unui fir de sîrmă (la curenți mai mici), din cupru sau argint, care se topește rapid (miimi de secundă), la scurtcircuit sau într-un timp mai lung (cîteva secunde) la suprasarcini de durată.

Siguranțele cu filet sînt cele mai răspîndite, fiind întîlnite și în instalațiile electrice interioare din locuințe și avînd curenți de lucru de 6 ... 200 A. Ele cuprind (fig. 7.14) un soclu *A* avînd carcasa de porțelan *1*, șuruburile de legătură *2*, filetul *3* și piesa de contact *4* în care se introduce patronul *B* avînd un corp de porțelan *5*, firul fuzibil *6* introdus într-o masă de nisip *7* și capacele

de contact *8*. Capacul filetat *C*, format din piesa izolantă *9* și filetul metalic *10*, asigură închiderea patronului precum și presiunea de contact. În figura 7.14 s-a indicat prin săgeți traseul curentului prin siguranță.

Alte tipuri de siguranțe sînt cele cu mîner care, principial, sînt asemănătoare celor de înaltă tensiune, adică au forma unor tuburi conținînd firul sau platbanda fuzibilă fixate prin perechi de cuțite-furci. Siguranțele cu mîner se construiesc pentru curenți mai mari (60 ... 1000 A).

În țara noastră, aparatele electrice de joasă tensiune se fabrică în principal la Întreprinderea Electroaparataj din București.

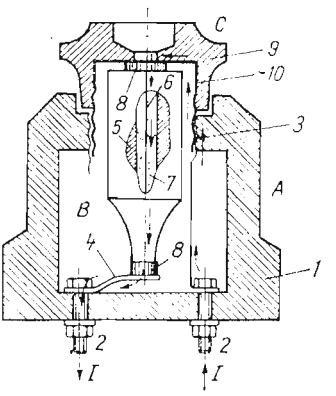


Fig. 7.14. Siguranță cu filet

REZUMAT

● Separatoarele sînt aparate care se manevrează fără curent și care asigură „separarea" circuitelor de înaltă tensiune.

● Întreruptoarele, spre deosebire de separatoare, permit închiderea sau deschiderea circuitelor de joasă sau înaltă tensiune în regim de circulație a curentului de intensitate normală sau de scurtcircuit. Întreruptoarele se numesc manuale dacă sînt manevrate cu ajutorul forței musculare și automate dacă pot fi manevrate prin comandă electrică de la distanță de către om sau de către dispozitive speciale numite „relee de protecție".

● Contactoarele sînt asemănătoare întreruptoarelor automate însă ele au o „putere de rupere" mai mică, adică nu pot deschide curenți de scurtcircuit.

● Siguranțele fuzibile sînt aparate de protecție contra supracurenților a circuitelor de înaltă și joasă tensiune, asigurînd întreruperea circuitelor respective prin topirea unor benzi sau fire metalice.

● Descărcătoarele sînt aparate de protecție contra supratensiunilor ce apar în instalațiile de înaltă și joasă tensiune.

VERIFICAREA CUNOȘTINȚELOR

1. Un separator de pe un circuit de înaltă tensiune poate fi manevrat:
   a — sub curent, fără tensiune?
   b — sub tensiune, fără curent?
   c — fără tensiune și fără curent?
2. În circuitul de montare a contactoarelor trebuie să se prevadă și:
   a — siguranțe fuzibile?
   b — separatoare?
   c — întreruptoare?
3. Întreruptoarele automate asigură:
   a — deschiderea vizibilă a circuitului electric?
   b — declanșarea automată la supratensiuni?
   c — declanșarea automată la scurtcircuite?

CAPITOLUL 8

MĂSURĂRI ELECTRICE

A. NOȚIUNI GENERALE

În procesele de producere, transport, distribuție și utilizare a energiei electrice apar o serie de mărimi (parametri) electrice cum sînt: tensiunea, frecvența, puterea, energia etc.

În scopul conducerii acestor procese este necesară o informare cu caracter cantitativ asupra acestor parametri, respectiv este necesară măsurarea valorilor lor. Astfel, au apărut o serie de aparate de măsurare electrice (voltmetre, ampermetre, wattmetre etc.) realizate pe baza a diverse principii constructive. Măsurarea mărimilor electrice se poate face însă folosind diferite aparate de măsurare precum și diferite metode de măsurare.

● **Din punctul de vedere al principiului constructiv** aparatele electrice de măsurare se împart în: *magnetoelectrice; electromagnetice; electrodinamice; logometre; de inducție* etc.

● **Din punctul de vedere al mărimii electrice măsurate** se disting: *galvanometre* (sarcini electrice — curenți mici); *voltmetre* (tensiune); *ampermetre* (intensitate); *wattmetre* (putere); *frecvențmetre* (frecvență); *contoare* (energie) etc.

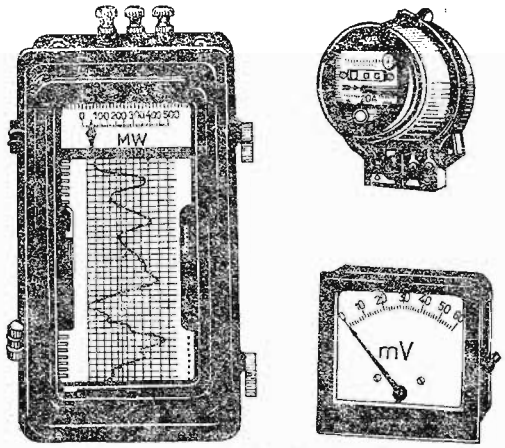


Fig. 8.1. Aparate electrice de măsurat:
a — aparat înregistrator (megawattmetru); *b* — aparat integrator (contor de energie); *c* — aparat indicator (milivoltmetru).

● **Din punctul de vedere al citirii indicațiilor aparatului,** există:

— *aparate cu citire directă,* care pot fi cu ac indicator și scară gradată (fig. 8.1, *c*) sau integratoare — contor (fig. 8.1, *b*);

— *aparate înregistratoare,* care înregistrează cu cerneală pe o bucată de hîrtie mărimea măsurată (fig. 8.1, *a*).

● **Din punctul de vedere al preciziei măsurării** aparatele de măsurare electrice se definesc în raport cu clasa de precizie a lor.

Prin *clasă de precizie p* se înțelege valoarea maximă a erorii relative r (%) — care reprezintă eroarea de măsurare e în raport cu valoarea reală U_r a mărimii măsurate U_m la capătul scării aparatului — adică:

$$p = r\%; \quad r = \frac{e}{U_r} = \frac{U_r - U_m}{U_r} \times 100.$$

De exemplu, dacă la o rețea a cărei tensiune reală este de 100 V (U_r = = 100 V) un voltmetru oarecare măsoară 98 V (U_m = 98 V), rezultă o eroare de măsurare („absolută"):

$$e = U_r - U_m = 100 - 98 = 2 \text{ V}$$

sau o eroare relativă

$$r(\%) = \frac{e}{U_r} = \frac{U_r - U_m}{U_r} \times 100 = \frac{2}{100} \times 100 = 2.$$

În acest caz se spune că clasa de precizie a aparatului este 2.

Aparatele de măsurare electrice se construiesc:

— clasă 0,2 (pentru laboratoare — măsurări de mare precizie);

— de clasă 0,5 (pentru laboratoare și verificări);

— de clasă 1, clasă 1,5 sau clasă 2,5 (pentru folosirea în instalații electrice).

Un aparat de măsurare poate fi definit simultan pe baza criteriilor de clasificare arătate mai sus; de exemplu: wattmetru electrodinamic, înregistrator, clasa de precizie 1,5 etc.

În cele ce urmează vor fi descrise pe scurt cele mai răspîndite tipuri de aparate de măsurare, precum și metodele de măsurare a mărimilor electrice uzuale.

B. APARATE ELECTRICE DE MĂSURARE

1. APARATE MAGNETOELECTRICE

Aceste tipuri de aparate funcționează pe baza forțelor „magnetoelectrice" produse de un cîmp magnetic asupra unei bobine (echipaj mobil) parcurs de curent și situat în cîmpul respectiv (v. cap. II).

● **Elemente constructive.** Un aparat magnetoelectric se prezintă ca în figura 8.2. Un magnet permanent *1* în formă de potcoavă este prevăzut cu piesele polare *2* (N și S) cu o deschidere cilindrică, în care se află (concentric) miezul cilindric *3*. Elementul mobil este bobina *4* care se poate deplasa în întrefierul format din piesele *2* și *3* și care se rotește în jurul semiaxelor *5* (o semiaxă *5* este plasată în cealaltă parte a bobinei, deci nu se vede).

Semiaxele *5* sînt centrate și reglate să se rotească ușor prin șuruburile *6* avînd lagăre de „piatră" (agat) și fiind înșurubate în suportul *16*. Solidar cu axul *5* și perpendicular pe acesta este fixat acul indicator *7*, al cărui vîrf se deplasează în fața diviziunilor unei scări gradate *8*. Acul se echilibrează prin construcție cu ajutorul contragreutăților *9* ce se pot deplasa pe tijele filetate *10*.

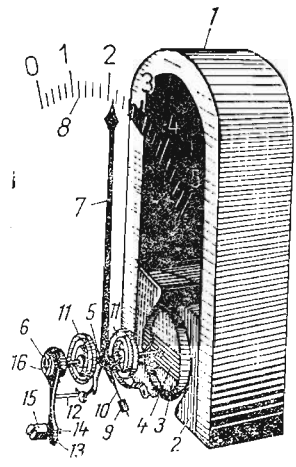


Fig. 8.2. Aparat magnetoelectric.

Bobina *4* cu axul *5* și acul indicator *7* (împreună bineînțeles, cu contragreutățile *9* de pe tijele *10*) constituie împreună *echipajul mobil* al aparatului, care poate fi deplasat:

— de cuplul activ creat de forțele magnetoelectrice din întrefier cînd bobina este parcursă de curent, deplasare ce are loc în sensul rotirii acelor de la ceasornic (sens trigonometric negativ);

— de cuplul rezistent creat de arcurile spirale *11* și care avînd sens contrar celui de mai sus (sens trigonometric pozitiv) menține cchipajul mobil (în lipsa curentului) pe poziția de zero.

Pentru reglarea precisă a poziției de zero capătul liber al unuia dintre arcurile spirale *11* se fixează prin tija *12* pe furca *13*, în care intră un bolț *14* plasat excentric pe axul izolant *15*. Prin rotirea axului *15* bolțul *14* împinge (stînga-dreapta) furca *13*, modificînd poziția capătului liber al arcului *11*. În acest fel variază în limite foarte mici valoarea cuplului rezistent, deci se poate modifica poziția de repaus (zero) a acului indicator.

● **Funcționare.** Cînd prin bobina aparatului trece un curent continuu I, echipajul mobil este supus unui moment activ M_a datorat forțelor magnetoelectrice F (fig. 8.3), a cărui valoare este dată de relația:

$$M_a = B_0 nsI,$$

în care:

B_0 este inducția (Wb/m^2) în întrefier produsă de magnetul permanent;

n — numărul de spire al bobinei;

s — suprafața bobinei (m^2).

Întrucît B, n și s sînt mărimi constante pentru un aparat dat, rezultă că momentul activ M_a este proporțional cu curentul I:

$$M_a = K_a I \tag{8.1}$$

unde s-a notat:

$$K_a = B_0 ns.$$

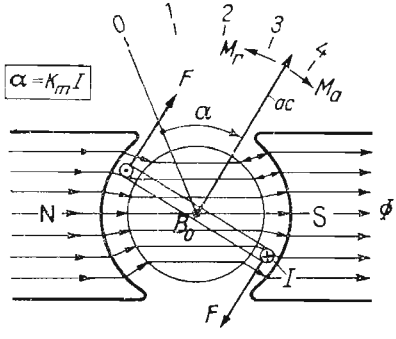


Fig. 8.3. Determinarea cuplurilor la aparatele magnetoelectrice.

Pe de altă parte, momentul rezistent M_r dat de resortul spiral este proporțional cu unghiul de rotire α:

$$M_r = K_r \alpha \tag{8.2}$$

în care K_r este o constantă specifică resortului.

Așadar, pe măsură ce crește curentul aplicat aparatului, acul indicator se va deplasa cu un unghi mai mare, pînă ce cele două cupluri se vor echilibra:

$$M_a = M_r \Rightarrow K_a I = K_r \alpha.$$

Prin urmare, unghiul de deviație α va fi:

$$\alpha = \frac{K_a}{K_r} I = K_m I \qquad (8.3)$$

adică, proporțional cu curentul I aplicat aparatului, avînd un factor de proporționalitate $K_m \left(K_m = \frac{K_a}{K_r} \right)$.

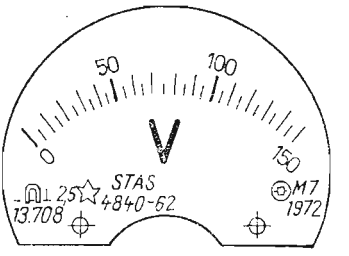


Fig. 8.4. Cadranul unui voltmetru magnetoelectric.

Observația 1. Din figura 8.3 se constată că pentru ca forțele magnetoelectrice să creeze cuplul activ în sensul dorit, este necesar ca curentul continuu I aplicat să aibă un anumit sens de circulație în bobină adică o anumită „polaritate". Dacă se inversează legătura la bornele aparatului, acul indicator tinde să se deplaseze în sens invers („bate în opritor") deci rămîne practic pe zero, avînd o tijă care îl oprește. Rezultă că bornele aparatelor magnetoelectrice trebuie marcate (+ și −).

Observația 2. Ținîndu-se seamă de cele arătate mai sus rezultă că aplicîndu-se un curent alternativ de frecvență industrială ($f = 50$ Hz) deci un curent care își schimbă sensul foarte rapid (100 ori/secundă) acul indicator va rămîne pe zero, neputînd urmări aceste variații întrucît cuplul activ mediu este nul. Așadar, aparatele magnetoelectrice nu pot fi folosite la măsurarea curentului alternativ decît numai dacă acesta este în prealabil redresat.

Observația 3. Deoarece deviația acului aparatului magnetoelectric este proporțională cu curentul, scara aparatului este „uniformă", adică indicațiile 1, 2, 3 ... corespunzînd de exemplu tensiunilor de 50 V, 100 V, 150 V ... se află plasate la unghiuri egale între ele, adică sînt echidistante (fig. 8.4).

● **Utilizare.** Aparatele magnetoelectrice sînt foarte robuste, sensibile și de aceea sînt și foarte răspîndite, fiind folosite în construcția: ampermetrelor, voltmetrelor, galvanometrelor, a aparatelor universale etc., putînd fi realizate cu clase de precizie foarte bune (0,5 ... 1,5).

2. APARATE ELECTROMAGNETICE

Sînt aparate care funcționează pe baza fenomenului electromagnetic, adică a atragerii (respingerii) unui element mobil din material magnetic de către o bobină fixă parcursă de curent.

● **Elemente constructive.** În figura 8.5 este arătat sistemul de acționare al unui aparat electromagnetic cu bobină cilindrică. Curentul I străbate bobina cilindrică *1* (desenată secționat) în interiorul căreia se află un miez magnetic fix *2* și un miez magnetic mobil *3* solidar cu axul echipajului mobil. La trecerea curentului prin bobină, cele două miezuri (*2* și *3*) se magnetizează la fel și ca urmare, miezul *3* este respins rotind axul împreună cu acul indicator *4*. Resortul spiral *5* creează ca și în cazul precedent cuplul antagonist al echipajului mobil.

Paleta *6* solidară cu acul indicator se deplasează în spațiul închis *7* (desenat secționat) constituind un „amortizor cu aer" al sistemului mobil. Amorti-

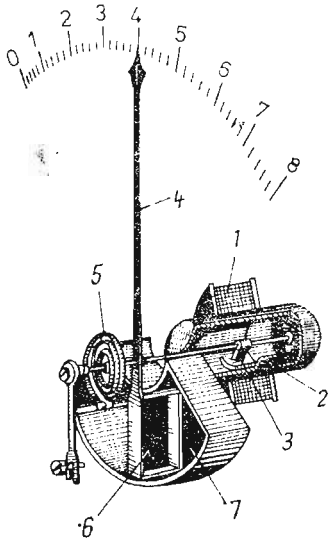


Fig. 8.5. Aparat electromagnetic.

zarea este necesară pentru ca în momentul aplicării curentului, acul să se deplaseze lin („amortizat") și să se oprească la indicația corespunzătoare fără a descrie oscilații în jurul acelui punct.

● **Funcționare.** Deoarece forțele electromagnetice sînt porporționale cu pătratul fluxului magnetic, iar fluxul este proporțional cu curentul I, rezultă valoarea momentului activ:

$$M_a = K_a I^2. \tag{8.4}$$

Momentul rezistent M_r este dat de aceeași expresie ca și în cazul precedent:

$$M_r = K_r \alpha. \tag{8.5}$$

Rezultă, din condiția de egalitate a cuplurilor în momentul echilibrului:

$$M_a = M_r \Rightarrow K_a I^2 = K_r \alpha.$$

Prin urmare unghiul α depinde de pătratul curentului:

$$\alpha = \frac{K_a}{K_r} I^2 = K_e I^2 \tag{8.6}$$

coeficientul $K_e \left(K_e = \frac{K_a}{K_r} \right)$ fiind un factor de proporționalitate.

Observația 1. Deoarece momentul activ este proporțional cu pătratul curentului, rezultă că echipajul mobil își păstrează sensul de rotație independent de semnul cureutului ($+ I$ sau $- I$), adică aparatul măsoară corect, independent de modul de legare la bornele aparatului respectiv.

Rezultă că bornele aparatelor electromagnetice nu trebuie marcate.

Observația 2. Ținîndu-se seamă de cele de mai sus rezultă că aplicîndu-se un curent alternativ aparatul electromagnetic acționează dînd o indicație (unghi) proporțională cu pătratul valorii eficace a curentului respectiv.

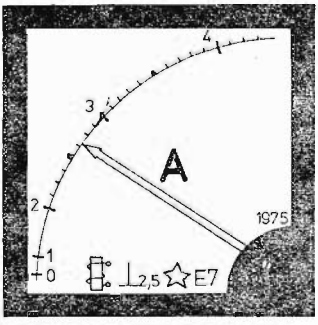


Fig. 8.6. Cadranul unui ampermetru electromagnetic.

Observația 3. Deoarece deviația acului aparatului electromagnetic depinde de pătratul curentului, scara aparatului este „neuniformă", adică indicațiile 1, 2, 3... corespunzînd de exemplu curenților de 1 A, 2 A, 3 A ... se află plasate la unghiuri proporționale cu numerele $1(1^2)$, $4(2^2)$, $9(3^2)$ ... În acest fel indicațiile sînt mai dese la începutul scării și se distanțează din ce în ce mai mult spre sfîrșitul scării (de exemplu — fig. 8.6).

● **Utilizare.** Aparatele electromagnetice sînt foarte răspîndite ca ampermetre sau ca voltmetre de tablou (de panou) pentru măsurarea intensității, respectiv a tensiunii, în curent alternativ. Folosirea lor ca aparate de tablou se datorește avantajelor de a fi relativ ieftine, de a avea o bună

„stabilitate" (rezistență) la suprasarcini electrice și șocuri mecanice și de a putea fi folosite fără nici un accesoriu (transformatoare de măsură sau șunturi) la curenți mari (200 ... 300 A). Aceste tipuri de aparate prezintă în schimb dezavantajul unor erori de măsurare mai mari (clasa de precizie este 1,5 ... 2,5).

3. APARATE ELECTRODINAMICE

Sînt aparate la care momentul activ al echipajului mobil se realizează pe baza interacțiunii între cîmpurile a două bobine concentrice parcurse de curenții I_1 și I_2, dintre care o bobină este fixată, iar cealaltă este plasată pe echipajul mobil (forțe electrodinamice).

Aparatele electrodinamice (fig. 8.7) se aseamănă principial cu cele magnetoelectrice, în sensul că în locul cîmpului constant dat de magnetul permanent, aici apare un cîmp creat de bobina fixă, cîmp care poate fi, însă, constant sau variabil.

● **Elemente constructive.** Din figura 8.7 se observă că bobinele fixe *1* sînt identice între ele și astfel așezate încît să formeze un cîmp magnetic uniform bobinei mobile *2*. Ca și în cazurile precedente, axul cu care este solidarizată bobina *2* constituie împreună cu arcurile spirale *3*, acul indicator *4* și paleta de amortizare *5* — echipajul mobil al aparatului electrodinamic.

Notă. Dacă în interiorul bobinei mobile se află un miez cilindric de fier (ca în figura 8.7), aparatul se numește *ferodinamic*.

● **Funcționare.** Întrucît momentul activ depinde de produsul curenților I_1 și I_2 ce străbat cele două bobine:

$$M_a = K_a I_1 I_2 \tag{8.7}$$

iar momentul rezistent este, ca și în celelalte cazuri, proporțional cu unghiul α:

$$M_r = K_r \alpha \tag{8.8}$$

rezultă că la echilibru ($M_a = M_r$):

$$K_a I_1 I_2 = K_r \alpha.$$

Deviația (indicația) aparatului va depinde de produsul celor doi curenți:

$$\alpha = \frac{K_a}{K_r} I_1 I_2 = K_f I_1 I_2. \tag{8.9}$$

Dacă cei doi curenți aplicați sînt alternativi, avînd valorile eficace I_1 și I_2 și un unghi de defazaj φ între ei, indicația α a aparatului va fi:

$$\alpha = K_f I_1 I_2 \cos \varphi.$$

● **Utilizare.** Aparatele electrodinamice prezintă următoarele avantaje:

— pot fi folosite atît în curent continuu cît și în curent alternativ;

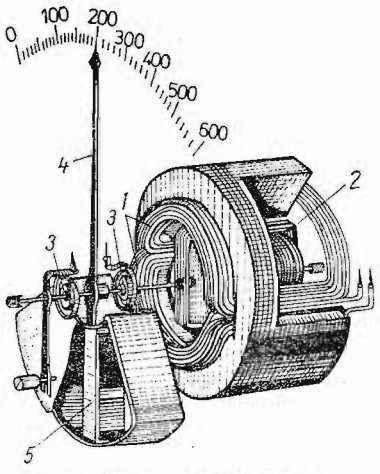


Fig. 8.7. Aparat electrodinamic.

— au clasă de precizie bună (clasa 1);

— sînt indicate pentru măsurarea unor mărimi compuse din două mărimi electrice elementare (de exemplu puteri → $P = U \cdot I$).

Aceste aparate prezintă însă și dezavantajele următoare:

— consum mare de energie;

— indicațiile sînt influențate de cîmpurile magnetice exterioare (parazite);

— scara lor este neuniformă (asemănătoare celei din figura 8.6).

Sînt folosite ca ampermetre sau voltmetre (caz în care cele două bobine sînt legate în serie, deci parcurse de același curent), dar mai ales ca wattmetre și varmetre.

4. APARATE CU INDUCȚIE

Aparatele de inducție funcționează pe baza interacțiunii fluxurilor magnetice (create de una sau mai multe bobine), cu curenții induși de acestea în echipajul mobil realizat sub forma unui disc din aluminiu. Rezultatul interacțiunii este rotirea discului din aluminiu.

Funcționarea principială se poate urmări în figura 8.8. Curenții I_1 și I_2 aplicați unor bobine cu miez de fier creează fluxurile magnetice Φ_1 și Φ_2 ce străbat discul din aluminiu D. În discul respectiv fluxurile Φ_1 și Φ_2 induc curenții (turbionari) i_1 și i_2. Interacțiunea (atragerea) fluxului Φ_1 cu curentul i_2 produce o forță F_a care tinde să rotească discul într-un sens, și similar, interacțiunea fluxului Φ_2 cu curentul i_1 produce forța F_b de sens contrar.

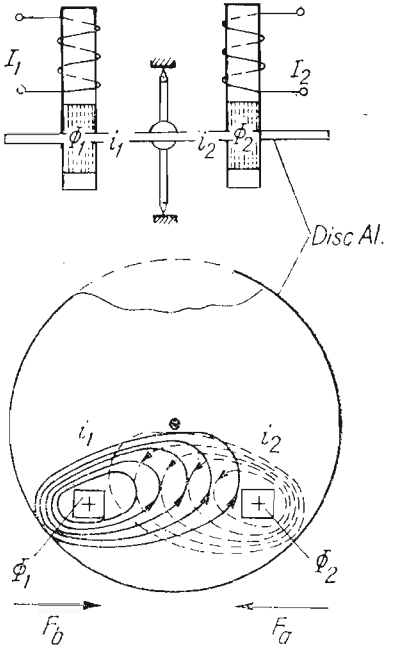
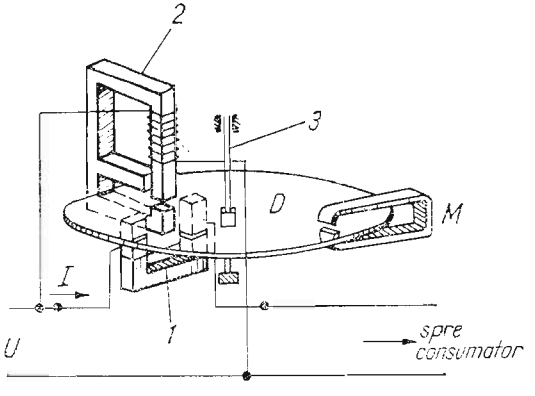


Fig. 8.8. Determinarea cuplurilor la aparatele de inducție.

Fig. 8.9. Aparat de inducție.



Observație. Întrucît principiul de funcționare al aparatelor de inducție se bazează pe interacțiunea dintre niște fluxuri magnetice și curenții induși de aceștia înseamnă că aparatele respective pot lucra numai în curent alternativ.

Ca urmare discul se va roti sub influența unui cuplu dat de diferența celor două forțe F_a și F_b produse de curenții alternativi I_1 și I_2.

Dacă, de exemplu (fig. 8.9), bobina *1* este parcursă de curentul absorbit de un consumator, iar bobina *2* de un curent proporțional cu tensiunea aplicată consumatorului, se poate aranja constructiv ca momentul activ aplicat discului D (fixat pe axul *3*) să fie dat de expresia:

$$M_a = K_a UI \cos \varphi = K_a P, \tag{8.10}$$

adică proporțional cu puterea absorbită de consumator.

Momentul rezistent M_r este creat de un magnet permanent M care produce o frînare („frecare vîscoasă") proporțională cu turația n_0 (viteza de rotație) a discului:

$$M_r = K_r n_0. \tag{8.11}$$

Dar, turația n_0 reprezintă un număr total de rotații n_T raportat la timpul Δt în care acestea s-au efectuat:

$$n_0 = \frac{n_T}{\Delta t} \left[\frac{\text{rot}}{\text{s}}\right] \tag{8.12}$$

Prin urmare:

$$M_r = K_r \frac{n_T}{\Delta t}. \tag{8.13}$$

La egalizarea celor două cupluri:

$$M_a = M_r \Rightarrow K_a UI \cos \varphi = K_r \frac{n_T}{\Delta t},$$

rezultă că:

$$n_T = \frac{K_a}{K_r} UI \cdot \cos \varphi \, \Delta t = K_i E_r, \tag{8.14}$$

în care:

$K_i = \frac{K_a}{K_r}$ reprezintă un factor de proporționalitate;

$E_r = UI \cos \varphi \Delta t = P \Delta t$ — energia absorbită de consumator în timpul Δt.

Însumînd (integrînd) numărul total de rotații n_T efectuat de disc într-un timp dat, se obține o mărime proporțională cu energia consumată în timpul respectiv. S-a obținut astfel un „contor" de energie.

Contoarele de energie (fig. 8.10) sînt echipate cu un dispozitiv mecanic de numărare care asigură „afișarea (prezentarea) numerică" a mărimii măsurate.

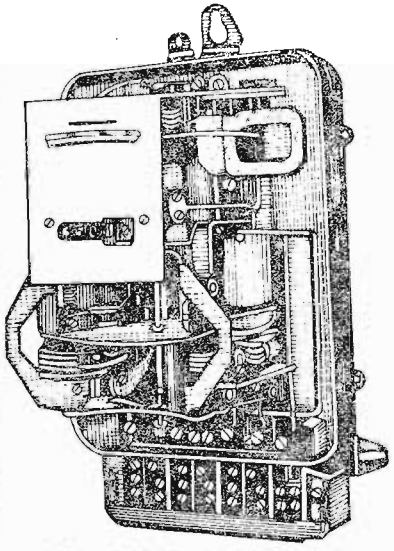


Fig. 8.10. Contor de energie.

5. SIMBOLIZAREA APARATELOR ELECTRICE DE MĂSURARE

Pentru a cunoaște mărimea de măsurare (tipul aparatului), principiul său de funcționare, felul curentului aplicat, clasa de precizie etc. s-au adoptat o serie de simboluri grafice care să informeze asupra acestor caracteristici.

Simbolurile aparatelor în funcție de mărimea de măsurare sînt de exemplu: A — ampermetru, V — voltmetru, W — wattmetru etc. În tabela 8.1 sînt prezentate cele mai importante mărimi electrice și aparatele corespunzătoare inclusiv simbolurile lor grafice.

Tabela 8.1

Aparate electrice de măsurare

Poz.	Mărimea electrică	Aparate de măsurat	
		denumire	simbol
1	tensiune	voltmetru	(V)
2	intensitate	ampermetru	(A)
3	putere	wattmetru	(W)
4	factor de putere	cosfimetru	(φ)
5	energie	contor	kwh
6	frecvență	frecvențmetru	(f)
7	rezistență	ohmmetru	(Ω)

Simbolurile care reprezintă principiul de funcționare a aparatului (magnetoelectric etc.) sînt date în tabela 8.2.

Clasa de precizie este arătată prin indicele de clasă (de exemplu 0,5), eventual subliniat sau încercuit.

Simbolurile care indică felul curentului sînt:

— curent continuu: — sau = ;
— curent alternativ: ~ ;
— curent continuu și alternativ ≂ ;
— curent trifazat: ≋.

Simbolurile pentru poziția de funcționare sînt:

— cu cadranul vertical: ⊥ ;
— cu cadranul orizontal: ⊓ ;
— cu cadranul oblic: < (exemplu: < 60° = înclinat la 60°).

Tensiunea de încercare a aparatului este indicată printr-o cifră înscrisă într-o steluță care exprimă valoarea în kilovați a tensiunii respective (de

Tabela 8.2

Simboluri care reprezintă principiul de funcționare

Felul aparatului (prinipiul de funcționare)	Simbol
Magnetoelectric	
Electromagnetic	
Electrodinamic	
Ferodinamic	
De inducție	

exemplu în figura 8.4, tensiunea de încercare este 2 kV). Dacă tensiunea de încercare este de numai 500 V, în interiorul steluței nu se scrie nimic.

Uneori, în locul steluței se poate folosi semnul ϟ (de exemplu:

ϟ2,5 = tensiunea de încercare este 2,5 kV).

Pe cadranul aparatului de măsurare mai sînt arătate de obicei și următoarele (figura 8.4 și figura 8.6):

— anul și seria de fabricație (de exemplu: 1975 M 11);

— standardul căruia îi corespunde aparatul (de exemplu: STAS 4640/62).

În țara noastră, aparatele de măsură se fabrică în principal la Întreprinderea de aparate electrice de măsură (IAEM) din Timișoara.

C. MĂSURAREA MĂRIMILOR ELECTRICE

1. INTRODUCERE

Orice aparat de măsurare este construit pentru un anumit fel de curent (continuu sau alternativ) și pentru anumite valori maxime ale mărimii de măsurat.

De exemplu, dacă un voltmetru este construit pentru 10 V curent continuu înseamnă, deocamdată, că sub această formă el nu poate fi folosit decît pentru tensiuni continue de maximum 10 V. De asemenea, de exemplu, un ampermetru de 1 A curent alternativ nu va putea suporta un curent alternativ mai mare decît această valoare. Totuși, există soluții de adaptare a acestor aparate astfel încît să fie posibilă măsurarea acelorași mărimi, însă de valori mai mari, printr-o divizare a mărimii măsurate. Această operație poartă denumirea de *extinderea domeniului de măsurare* și poate fi realizată în două moduri:

— prin folosirea unor rezistențe suplimentare ce se montează în serie cu voltmetrul (rezistențe adiționale) sau în paralel cu ampermetrul (șunturi);

Notă. Acest procedeu poate fi aplicat și în curent continuu și în curent alternativ.

— prin folosirea unor transformatoare de măsură (reductoare) care reduc tensiunea sau curentul de la o valoare mare la valoarea maximă admisă de aparat.

Notă. Acest procedeu se aplică numai în curent alternativ.

Mărimile alternative pot fi redresate (transformate în mărimi continue), pentru ca apoi să poată fi măsurate cu ajutorul aparatelor de curent continuu, însă în condițiile de divizare arătate mai sus.

Observație. O mărime alternativă poate fi măsurată cu un aparat de curent continuu după ce a fost redresată, însă o mărime continuă nu poate fi măsurată, practic, cu un aparat construit special pentru curent alternativ.

2. MĂSURAREA TENSIUNILOR ȘI CURENȚILOR

a. Măsurarea tensiunilor continue sau alternative

Tensiunile se măsoară în mod curent prin legarea voltmetrului în paralel (în derivație) pe circuit (fig. 8.11), adică dacă există un consumator C — de exemplu o lampă — voltmetrul se leagă în paralel cu lampa respectivă.

Atenție! Se va verifica mai întîi, privind pe cadranul aparatului, dacă voltmetrul este pentru felul curentului măsurat (continuu $=$, sau alternativ $\sim$, sau și continuu și alternativ $\simeq$) și dacă valoarea presupusă a rețelei nu depășește indicația maximă de pe scara voltmetrului.

Extinderea domeniului de măsurare al voltmetrului se face prin legarea în serie cu voltmetrul a unei rezistențe adiționale care să preia căderea de tensiune suplimentară. În orice caz, voltmetrul prevăzut cu rezistența adițională R_a se leagă tot în paralel cu consumatorul C (fig. 8.12).

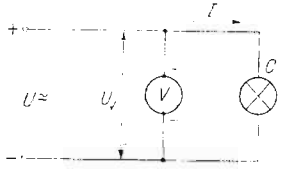


Fig. 8.11. Schema de legare directă a voltmetrului.

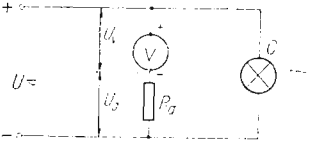


Fig. 8.12. Schema de legare cu rezistență adițională a voltmetrului.

Se presupune, de exemplu, că se dispune de un aparat magnetoelectric care are deviația maximă pentru o tensiune de 100 mV sau un curent de 1 mA. El poate fi folosit deci sau ca milivoltmetru (pentru domeniul 0 ... 100 mV), sau ca microampermetru (pentru domeniul 0 ... 1000 μA = 1 mA).

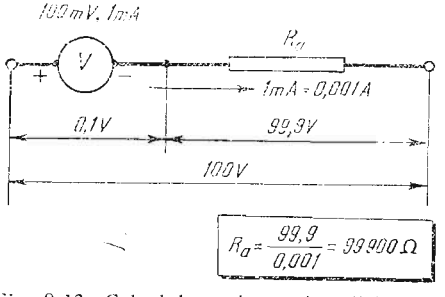


Fig. 8.13. Calculul rezistenței adiționale.

Dacă aparatul trebuie să indice tensiunea maximă de 100 V, atunci rezistența adițională R_a se calculează astfel (fig. 8.13):

— din valoarea totală a tensiunii $U = 100$ V, o tensiune de 100 mV $=$ $= 0{,}1$ V trebuie să fie aplicată aparatului ($U_V = 0{,}1$ V), iar restul (U_a) să „cadă" pe rezistența adițională R_a: $U_a = U - U_V = 100 - 0{,}1 = 99{,}9$ V;

— curentul ce străbate rezistența adițională trebuie să fie același cu cel maxim absorbit de voltmetru ($I_V = 1$ mA);

— rezultă valoarea rezistenței adiționale:

$$R = \frac{U_a}{I_V} = \frac{99{,}9 \text{ V}}{0{,}001 \text{ A}} = 9{,}99 \text{ k}\Omega.$$

Așadar, dacă scara are 100 de diviziuni (0 ... 100 mV), folosind rezistența de mai sus fiecare diviziune va reprezenta un volt.

b. Măsurarea curenților continui sau alternativi

Curenții se măsoară în mod obișnuit prin legarea ampermetrului în serie pe circuit, respectiv în serie cu consumatorul C (fig. 8.14). Este necesară, ca și în cazul voltmetrului, verificarea mai întîi a indicațiilor de pe cadranul aparatului.

Extinderea domeniului de măsurare al ampermetrului se face prin legarea în paralel cu ampermetrul a unei rezistențe-șunt care să permită trecerea curentului suplimentar. Și în acest caz ampermetrul cu șuntul său se leagă tot în serie pe circuit (fig. 8.15).

Se presupune, de exemplu, că trebuie măsurat cu același aparat folosit mai sus (1 mA, 100 mV) un curent de maximum 1 A.

În acest caz înseamnă că atunci cînd aparatul deviază la maximum, deci este parcurs de 1 mA, curentul total care parcurge ampermetrul în paralel cu șuntul este de 1 A. Rezistența șuntului R_S se calculează, deci, astfel (fig. 8.16):

— din valoarea totală a curentului $I = 1$ A un curent de 1 mA = 0,001 A trebuie să treacă prin ampermetru ($I_A = 0{,}001$ A), iar restul curentului, I_S, să treacă prin șunt:

$$I_S = I - I_A = 1 - 0{,}001 = 0{,}999 \text{ A};$$

— tensiunea de la bornele șuntului trebuie să fie aceeași cu cea maximă de la bornele ampermetrului ($U_A = 100$ mV = 0,1 V);

— rezultă valoarea rezistenței șuntului:

$$R_s = \frac{U_A}{I_S} = \frac{0{,}1}{0{,}999} = 0{,}1001 \ \Omega.$$

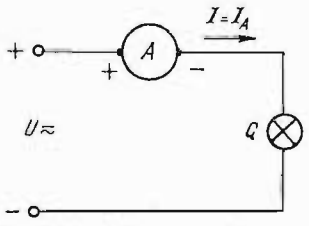


Fig. 8.14. Schema de legare directă a ampermetrului.

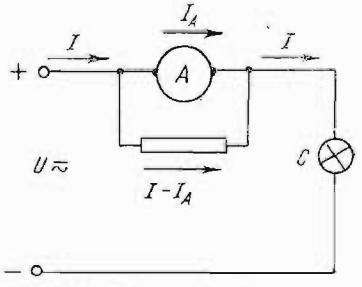


Fig. 8.15. Schema de legare cu șunt a ampermetrului.

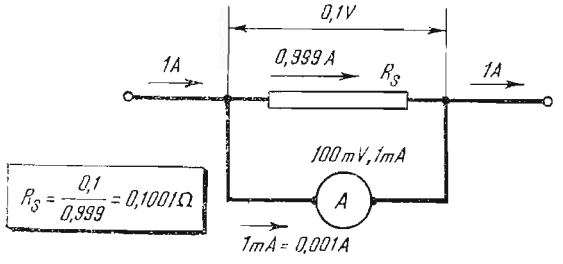


Fig. 8.16. Calculul rezistenței șuntului.

Așadar, dacă scara aparatului are 100 de diviziuni, folosind șuntul de mai sus, fiecare diviziune va reprezenta 10 mA

$$\left(\frac{1A}{100} = \frac{1\,000\,mA}{100} = \right.$$

$$\left. = 10\ mA/diviziune\right).$$

c. Măsurarea tensiunilor sau curenților alternativi folosind redresoare

În cele mai multe cazuri se folosește un microampermetru magnetoelectric introdus într-o punte redresoare avînd patru diode (fig. 8.17, *a*) sau — mai economic — două diode și două rezistențe (fig. 8.17, *b*). Diodele sînt în general diode semiconductoare.

Pe baza caracteristicilor diodelor (v. cap. X), eventual a rezistențelor din punte, se stabilește valoarea maximă a curentului I_a, respectiv a tensiunii U_a. Practic, aceste valori se pot determina și experimental.

Extinderea domeniului de măsurare al aparatului astfel alcătuit se face întocmai ca mai sus.

d. Măsurarea tensiunilor și curenților continui sau alternativi folosind aparate universale

Aceasta constituie o metodă obișnuită în practică. Aparatul respectiv, denumit uneori și *voltampermetru*, este constituit dintr-un microampermetru magnetoelectric care poate fi legat fie direct (curent continuu), fie prin punte redresoare (curent alternativ), și care cuprinde o serie de rezistențe adiționale (mai multe domenii de măsurare pentru tensiune) precum și o serie de șunturi (mai multe domenii de măsurare pentru curenți). Rezistențele

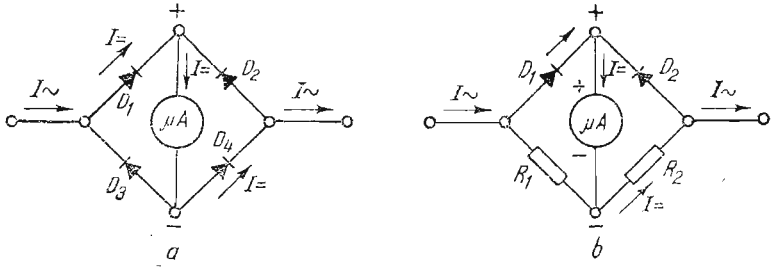


Fig. 8.17. Schema de măsurare cu redresor:
a — folosind patru diode; *b* — folosind două diode.

suplimentare precum și puntea redresoare pot fi introduse în circuit cu ajutorul unor comutatoare.

La măsurarea mărimilor în curent alternativ (curenți sau tensiuni) valorile indicate de aparatele cu redresoare sînt cele eficace.

e. Măsurarea tensiunilor și curenților trifazați

În cazul sistemelor trifazate apare necesar să se măsoare tensiunile pe fază, caz în care voltmetrele se montează în stea (fig. 8.18, *a*) sau tensiunile între faze, voltmetrele montîndu-se în triunghi (fig. 8.18, *b*).

Pentru măsurarea curenților se leagă în serie pe fiecare fază cîte un ampermetru (fig. 8.19).

Notă. Observațiile anterioare referitoare la extinderea domeniului de măsurare, la calculul rezistențelor suplimentare etc., sînt valabile, bineînțeles, și la sistemele trifazate.

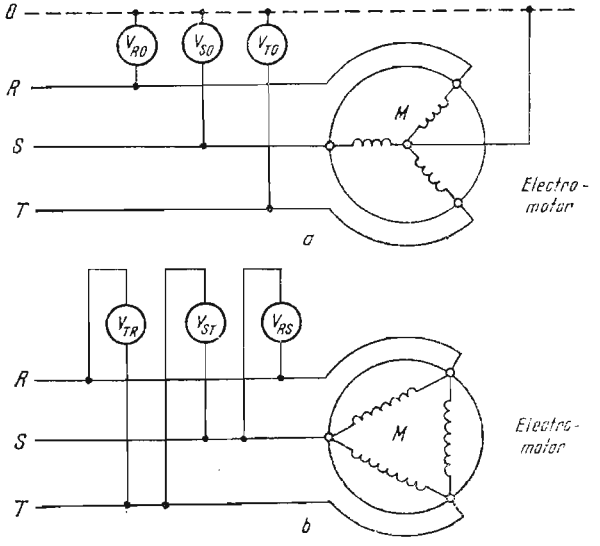


Fig. 8.18. Schema de legare a voltmetrelor la sistemele trifazate:
a — în stea; *b* — în triunghi.

3. MĂSURAREA PUTERILOR

a. Măsurarea puterii în curent continuu

Se pot folosi două metode de măsurare:

— *metoda indirectă*;

— *metoda directă*.

● **Metoda de măsurare indirectă** presupune măsurarea separată a curentului absorbit I și a tensiunii U, aplicate receptorului așa cum s-a arătat mai sus (fig. 8.20, *a*).

Puterea absorbită de receptor se deduce prin calcul:

$$P = UI[\mathrm{W}]. \qquad (8.15)$$

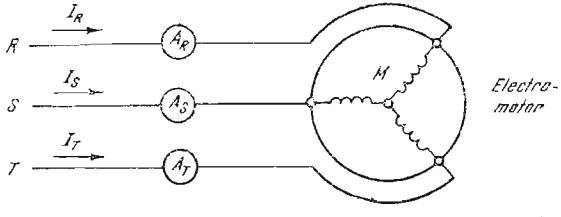


Fig. 8.19. Schema de legare a ampermetrelor la sistemele trifazate.

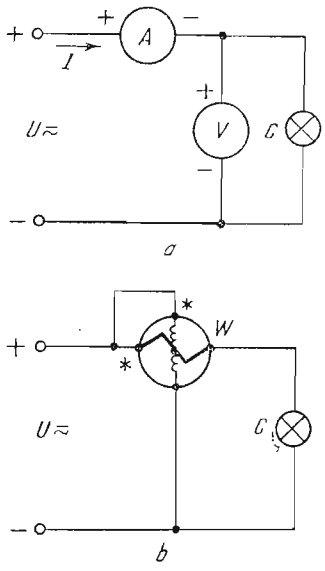


Fig. 8.20. Schema de măsurare a puterii:
a — metoda indirectă; *b* — metoda directă.

Atenție! Dacă tensiunea U se măsoară în volți, iar curentul I în amperi, puterea P rezultă în wați.

● **Metoda de măsurare directă** necesită un aparat special, wattmetru, care cuprinde două bobine, (aparat electrodinamic — v. fig. 8.7): o bobină de curent (fig. 8.20, *b*) montată ca și un ampermetru adică în serie pe circuit, și o bobină de tensiune montată ca și un voltmetru, adică în paralel.

Atenție! Pentru ca wattmetrul să măsoare corect, este necesar să se țină seamă de polaritatea bobinelor, acestea avînd marcată cu o steluță (*) sau cu semnul „plus" (+) bornele de „intrare" ale bobinei respective. Astfel, dacă borna „polarizată" a bobinei de tensiune este legată la conductorul +, atunci curentul trebuie să „intre" prin borna „polarizată" a bobinei de curent.

Notă. Dacă numai una din bobinele se inversează, wattmetrul, „bate invers", adică arată zero, indiferent de valoarea lui U și I.

b. Măsurarea puterii active în curent alternativ monofazat

Metoda de măsurare indirectă poate fi aplicată și în curent alternativ însă, practic, această soluție este nefolosită deoarece necesită pe lîngă ampermetru și voltmetru și un aparat special, *cosfimetrul*, cu ajutorul căruia se determină factorul de putere (cos φ), adică unghiul de decalaj între tensiune și curent.

După cum se știe, în curent alternativ monofazat puterea este dată de expresia:

$$P = UI \cos \varphi.$$

Metoda de măsurare directă este cea mai des folosită și necesită un wattmetru, special construit pentru curent alternativ, schema de legare fiind aceeași ca și la curentul continuu (fig. 8.20, *b*).

c. Măsurarea puterii active în curent alternativ trifazat

Se folosește, practic, exclusiv metoda directă, adică utilizînd wattmetre.

În cazul unui consumator trifazat „cu fir neutru" (de exemplu un motor M legat în stea — fig. 8.21, *a*), se pot folosi trei wattmetre monofazate avînd bobinele de curent legate pe fiecare fază, iar pe cele de tensiune — legate între faze și nul (metoda celor trei wattmetre). Dacă P_1, P_2 și P_3 sînt puterile indicate de cele trei wattmetre, puterea totală P_t consumată de motor va fi:

$$P_t = P_1 + P_2 + P_3[\mathrm{W}]. \qquad (8.16)$$

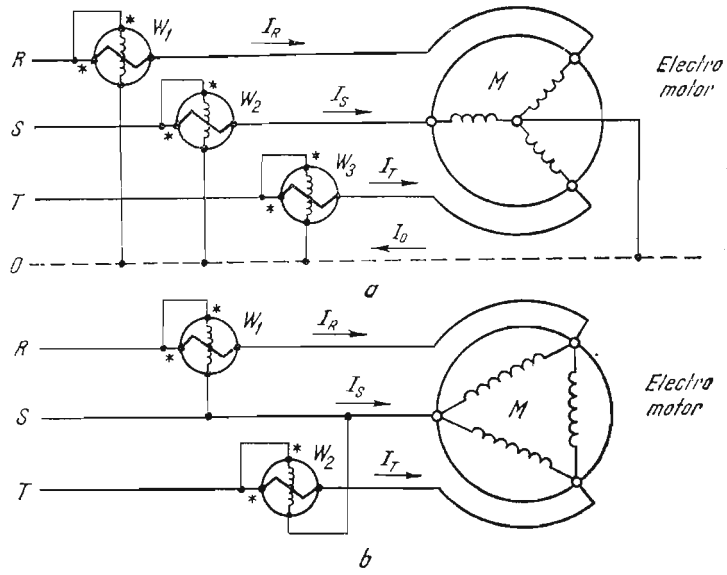


Fig. 8.21. Schema de măsurare a puterii active în curent alternativ trifazat:

a — metoda celor trei wattmetre; *b* — metoda celor două wattmetre.

În cazul unui consumator trifazat, „fără fir neutru" (de exemplu un motor M legat în triunghi — fig. 8.21, *b*) se folosesc numai două wattmetre monofazate montate pe două faze. Ca și în cazul precedent, puterea totală absorbită P_t este dată de suma puterilor indicate de cele două wattmetre:

$$P_t = P_1 + P_2[\mathrm{W}]. \tag{8.17}$$

Notă. În practică se construiesc și wattmetre trifazate cu trei echipaje mobile sau cu două echipaje mobile, care au aceleași semne de legare ca în figurile 8.21, *a* și *b*, însă puterile sînt însumate mecanic pe același ax, aparatul avînd un singur ac indicator, deci un singur cadran pe care se citește puterea totală absorbită.

Măsurarea puterii reactive se realizează cu ajutorul varmetrelor (similare wattmetrelor) acestea avînd un mod de montare (conectare) asemănător wattmetrelor.

4. MĂSURAREA ENERGIEI

După cum se știe, energia reprezintă însumarea (integrarea) în timp a puterii și este măsurată cu ajutorul unor aparate speciale cu indicare numerică, numite *contoare*.

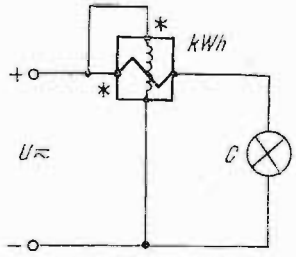


Fig. 8.22. Schema de legare (conectare) a contorului (de curent continuu sau de curent alternativ monofazat).

a. Măsurarea energiei în curent continuu

Se realizează cu ajutorul unor contoare speciale, dinamometrice, denumite și *de tip motor*.

Avînd două bobine ca și un wattmetru și un rotor care se învîrtește permanent *, contorul se montează ca și un wattmetru (fig. 8.22).

Energia indicată de contor se exprimă în wattore (Wh) sau kilowattore (kWh).

b. Măsurarea energiei în curent alternativ monofazat

Contoarele folosite în acest caz sînt aparate de inducție (v. paragraful B4 — fig. 8.9), schema de legare fiind aceeași ca în curent continuu (fig. 8.22).

c. Măsurarea energiei în curent alternativ trifazat

Se realizează cu ajutorul contoarelor trifazate care în cazul consumatorilor cu fir neutru (în stea) se construiesc cu trei echipaje mobile (fig. 8.23, *a*), iar pentru consumatorii fără fir neutru (în stea sau triunghi) — cu două echipaje mobile (fig. 8.23, *b*).

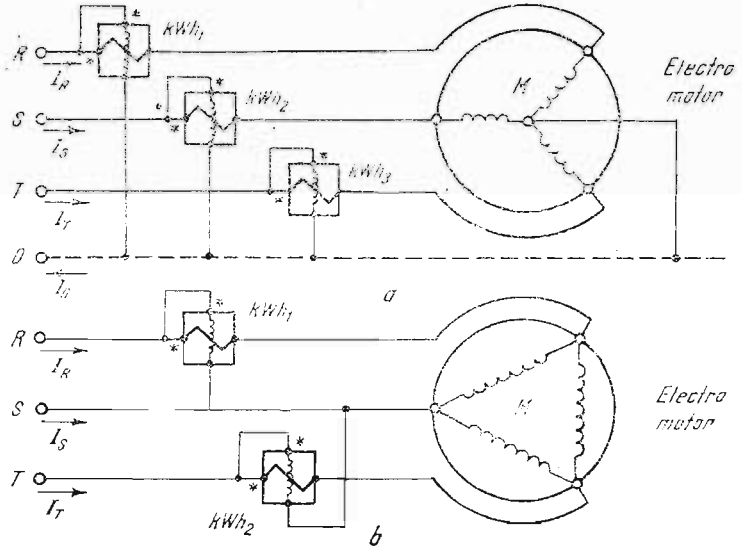


Fig. 8.23. Schema de legare a contoarelor trifazate:
a — cu trei echipaje mobile; *b* — cu două echipaje mobile.

* După cum s-a arătat în paragraful B4, cuplul motor este proporțional cu puterea absorbită.

Observație. Montarea contoarelor în ceea ce privește modul de legare a bobinelor, inclusiv respectarea polarității acestora, se face după aceleași reguli ca și în cazul wattmetrelor. Contoarele trifazate, cu două sau trei echipaje mobile, se construiesc sub forma a două, respectiv trei, aparate de inducție (v. fig. 8.9) avînd discurile de aluminiu plasate pe același ax.

5. MĂSURAREA REZISTENȚELOR

Pentru măsurarea rezistențelor sînt folosite pe scară industrială două metode:

— *metoda voltmetrului și ampermetrului*;

— *metoda punții Wheatstone*.

De asemenea, pentru rezistențe foarte mari (rezistențe de izolație) sînt folosite aparate speciale numite *ohmmetre* sau *megohmmetre*.

● **Metoda voltmetrului și ampermetrului** se bazează pe determinarea prin calcul a valorii rezistenței R prin măsurarea unui curent I absorbit de o rezistență dată și a căderii de tensiune corespunzătoare U la bornele aceleiași rezistențe:

$$R = \frac{U}{I}. \tag{8.18}$$

Sînt folosite două scheme de măsurare: *montajul aval* („la vale" = = mai jos) cînd voltmetrul este plasat după (mai jos decît) ampermetru (fig. 8.24, *a*) și *montajul amonte* („la munte = mai sus), cînd voltmetrul este plasat înaintea (mai sus decît) ampermetrului (fig. 8.24, *b*).

Observația 1. Montajul aval este indicat pentru măsurarea rezistențelor mici (sub 1 Ω), adică atunci cînd curentul I_V absorbit de voltmetru — și care străbate și el ampermetrul — este neglijabil în raport cu curentul I_R absorbit de rezistența R.

Observația 2. Montajul amonte este indicat pentru măsurarea rezistențelor mari, adică atunci cînd căderea de tensiune pe ampermetru U_A — care este și ea măsurată de voltmetru — este neglijabilă în raport cu tensiunea U_R de pe rezistența R.

● **Metoda punții Wheatstone** folosește o punte de măsurare la care (fig. 8.25):

— R_a și R_b sînt două rezistențe ale aceluiași potențiometru cu cursor ($R_a + R_b = R_0 = constant$);

— R_y este o rezistență variabilă în trepte putînd lua valorile fixe (de exemplu 0,1; 1; 10; 100 sau 1 000 Ω);

— R_x este rezistența necunoscută, a cărei valoare trebuie măsurată.

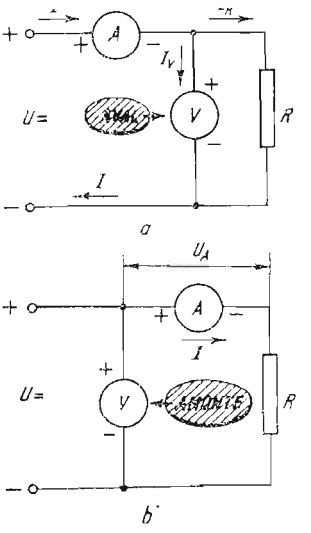


Fig. 8.24. Schemele de măsurare a rezistențelor cu voltmetru și ampermetru:
a — montaj aval; *b* — montaj amonte.

Se demonstrează că puntea se echilibrează, adică miliampermetrul (mA) indică zero, dacă:

$$\frac{R_a}{R_b} = \frac{R_x}{R_y} \tag{8.19}$$

de unde rezultă posibilitatea de măsurare a rezistenței necunoscute cunoscînd valorile celorlalte trei rezistențe:

$$R_x = \frac{R_a}{R_b} R_y. \tag{8.20}$$

Puntea de măsurare se realizează sub forma unei casete prevăzute cu următoarele părți (fig. 8.26):

— bornele x_1 și x_2 la care se conectează rezistența de măsurare R_x;

— bornele e_1 și e_2 unde este legată sursa de tensiune E (4 ... 6 V);

— miliampermetrul mA, realizat sub forma unui aparat magnetoelectric „cu zero la mijlocul scării", adică la care acul deviază spre stînga (—) dacă curentul I_0 are un sens și spre dreapta (+) dacă I_0 are sens contrar;

— bucșele marcate cu 0,1; 1 ... 1 000 (ohmi) în care, prin introducerea unei fișe rezistența R_y capătă valoarea respectivă;

— rigla gradată circulară C a cărei indicație din dreptul săgeții (→) arată raportul R_a/R_b;

— butonul B prin care se conectează sursa de tensiune E (pentru a nu consuma permanent).

Măsurarea se face în felul următor (se va urmări simultan — fig. 8.25 și fig. 8.26):

— se leagă rezistența R_x la bornele x_1 și x_2;

— se dă o valoare oarecare rezistenței R_y prin introducerea fișei într-una din cele cinci bucșe (de exemplu $R_y = 10$);

— se ține apăsat butonul B și, urmărind indicația miliampermetrului, se manevrează rigla circulară C;

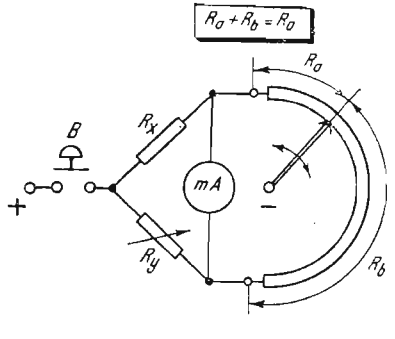


Fig. 8.25. Schema de măsurare a rezistențelor cu puntea Wheatstone.

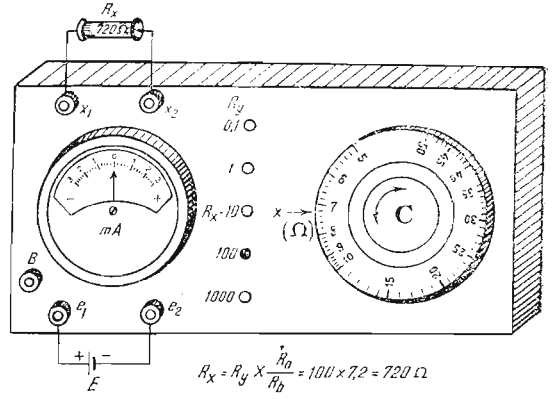


Fig. 8.26. Aspectul exterior al unei punți Wheatstone.

— dacă miliampermetrul mA deviază spre minus (—) C se rotește în sensul creșterii raportului R_a/R_b pînă ce acul vine la zero și invers *;

— în cazul în care ajungînd la valoarea maximă a raportului R_a/R_b (50) acul (care s-a apropiat de zero) nu a ajuns încă la zero, înseamnă că R_x are o valoare mai mare **, situație în care fișa se mută în bucșa imediat superioară (de exemplu $R_y = 100\ \Omega$) și operația de mai sus se reia pînă la echilibrarea punții. În acest caz valoarea rezistenței măsurate se citește făcînd produsul următor:

$$R_x = R_y(0{,}1 \ldots 1\,000) \times \text{raportul } \frac{R_a}{R_b}\ [\Omega].$$

Exemplu. În poziția din figură:

$$R_x = 100 \times 7{,}2 = 720\ \Omega.$$

● **Megohmmetrul.** Măsurarea rezistențelor mari, de exemplu cele de izolație ale unei instalații electrice, ale unei mașini sau ale unui aparat, se face cu ajutorul unor aparate speciale numite ohmmetre sau megohmmetre.

Notă. Aceste rezistențe sînt de ordinul a 300 ... 500 kΩ sau chiar mai mult.

Cel mai răspîndit ohmmetru este cel cu inductor, al cărui aspect exterior este dat în figura 8.27. Ohmmetrul cu inductor are schema din figura 8.28, în care G este un mic generator de curent continuu (dinam) acționat cu manivela M. Miliampermetrul mA este etalonat direct în ohmi sau kiloohmi.

Măsurarea se face în felul următor:

— se conectează rezistența de măsurare R_x la bornele x_1 și x_2;

— se ține apăsat butonul B (R_x este deci scurtcircuitată) și se rotește generatorul prin manivelă cu turație crescîndă pînă ce acul mA indică diviziunea zero;

— se ridică brusc mîna de pe butonul B, menținînd aceeași turație a generatorului, și se citește pe mA direct valoarea rezistenței R_x.

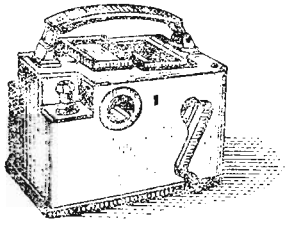


Fig. 8.27. Aspectul exterior al unui ohmmetru cu inductor.

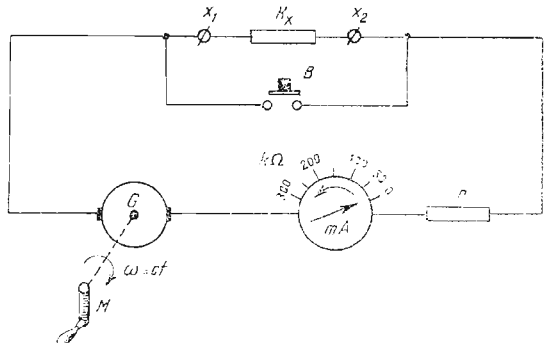


Fig. 8.28. Schema de măsurare a rezistențelor cu ajutorul ohmmetrului cu inductor.

* dacă mA deviază spre plus (+) C se rotește în sensul scăderii raportului R_a/R_b pînă ce acul ajunge la zero.

** de exemplu $R_x > 10 \times 50 = 500\ \Omega$.

Cea mai simplă metodă de măsurare a inductanțelor și a capacităților este următoarea:

— se efectuează o măsurare în curent continuu (fig. 8.29, *a*) determinîndu-se tensiunea la bornele U_c și curentul absorbit I_c de elementul respectiv și se deduce rezistența proprie:

$$R = \frac{U_c}{I_c} [\Omega]. \tag{8.21}$$

Se efectuează o măsurare în curent alternativ (fig. 8.29, *b*) determinînd similar, tensiunea U_a, curentul I_a, precum și frecvența f a rețelei. Cu ajutorul acestor mărimi se deduce impedanța Z a elementului:

$$Z = \frac{U_a}{I_a} [\Omega]. \tag{8.22}$$

Din expresia cunoscută a impedanței ($Z^2 = R^2 + X^2$ — v. cap. IV) se deduce reactanța X a elementului:

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} \tag{8.23}$$

din care se obține parametrul căutat:

— pentru inductanțe (L):

$$X = X_L = 2\pi f L \rightarrow L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{X}{2\pi f} [\mathrm{H}];$$

— pentru capacități (C):

$$X = X_C = \frac{1}{2\pi f C} \rightarrow C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2\pi f X} [\mathrm{F}].$$

Ca și pentru rezistențe, există punți speciale pentru măsurarea inductanțelor și capacităților.

D. TRANSFORMATOARE DE MĂSURĂ

1. TIPURI CONSTRUCTIVE

În curent alternativ curenții și tensiunile au uneori valori atît de mari, încît apare necesitatea transformării (reducerii) lor la valori ce pot fi măsurate cu aparatele obișnuite și nu prezintă pericol pentru personalul de exploatare. Acest lucru se realizează cu ajutorul *transformatoarelor de măsură*, care se construiesc pentru curent și pentru tensiune.

● **Transformatorul de curent** se folosește de obicei pentru curenți ce depășesc 15 A. El are un bobinaj primar, format din spire puține și groase,

care se leagă în serie cu circuitul primar și un bobinaj secundar la care se leagă ampermetrul sau bobina de curent a unui wattmetru sau contor.

Un transformator de curent este caracterizat de următoarele mărimi importante:

— tensiunea nominală primară (de izolație), care are valori standardizate (de exemplu 6, 10, 15, 20, 35, 110, 220, 400 kV și 750 kV);

— curentul primar nominal, care are de asemenea valori standardizate (de exemplu 50, 100, 150, 1 000, 2 000, 7 000 A);

— curentul secundar nominal, care de obicei are numai două valori standard: 5 A sau 1 A.

Curenții se indică de obicei sub forma raportului de transformare, adică a raportului dat de cei doi curenți (de exemplu 100/5 A, 1 500/5 A, 1000/1 A etc.).

Simbolizarea transformatorului de curent este dată în figura 8.30.

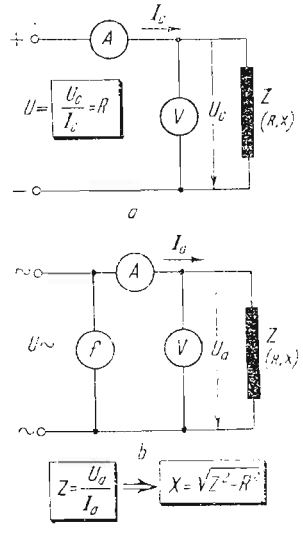


Fig. 8.29. Schema de măsurare a inductanțelor și capacităților:
a — schema de încercare în c.c.; *b* — schema de încercare în c.a.

Observație. Transformatoarele de curent au borne polarizate, adică se convine că dacă curentul primar I intră prin borna polarizată, curentul secundar iese prin borna polarizată (secundară).

Atenție! Nu este permis ca să se întrerupă circuitul secundar al transformatorului de curent cînd cel primar este parcurs de curent; în caz contrar:

— în bobinajul secundar apar tensiuni mari, periculoase pentru personalul de exploatare;

— miezul de fier se încălzește excesiv și transformatorul se arde.

● **Transformatorul de tensiune** se folosește de obicei pentru tensiuni ce depășesc 1 kV. Bobinajul primar este format din spire multe și subțiri care se leagă în paralel cu circuitul primar (de înaltă tensiune), iar bobinajul secundar alimentează voltmetrul sau bobina de tensiune a unui wattmetru sau contor.

Un transformator de tensiune este caracterizat de următoarele mărimi:

— tensiunea nominală primară (de izolație) — care are aceleași valori standardizate ca la transformatorul de curent (de exemplu 6,10 ... 750 kV — între faze);

— tensiunea nominală secundară — care are de obicei o singură valoare standard: 100 V între faze.

În mod obișnuit aceste mărimi se dau direct sub forma raportului de transformare (de exemplu: $6\,000/100$ V sau $\frac{110\,000}{\sqrt{3}} \Big| \frac{100}{\sqrt{3}}$ V).

Ca și transformatoarele de curent, și cele de tensiune au bornele polarizate.

Simbolizarea transformatorului de tensiune este dată în fig. 8.30, *b*.

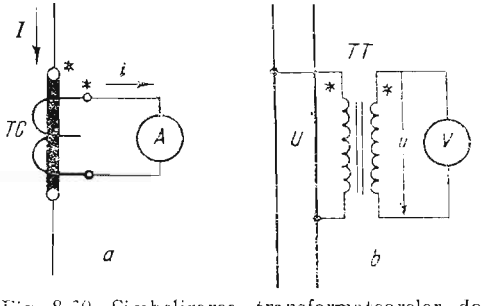


Fig. 8.30. Simbolizarea transformatoarelor de măsură:
a — de curent; *b* — de tensiune.

Transformatoarele de tensiune, ca și cele de curent, prezintă pe lîngă avantajul de a separa („galvanic") personalul de exploatare față de tensiunea înaltă și un avantaj economic în sensul că aparatele de măsurare folosite pot fi construite numai pentru valori standard. Astfel, toate voltmetrele ca și bobinele de tensiune ale wattmetrelor și contoarelor se construiesc numai pentru tensiunea de 100 V; de asemenea, toate ampermetrele sau bobinele de curent ale wattmetrelor (contoarelor) se construiesc numai pentru 5 A sau 1 A.

Modul de măsurare folosind trasformatoarele de curent sau de tensiune este foarte simplu de imaginat cunoscînd schema de legare a aparatelor respective în cazul cînd nu se folosesc transformatoare.

Astfel:

— în locul bobinei aparatului respectiv se introduce bobinajul primar al transformatorului;

— bobina aparatului se leagă în secundarul transformatorului.

Ca exemplu, în figura 8.31 se arată modul de legare prin transformatoare de măsură a trei ampermetre și trei voltmetre de pe o linie de înaltă tensiune *, iar în figura 8.32 — legarea unui contor cu două echipaje mobile pe circuitul de alimentare al unui motor de înaltă tensiune.

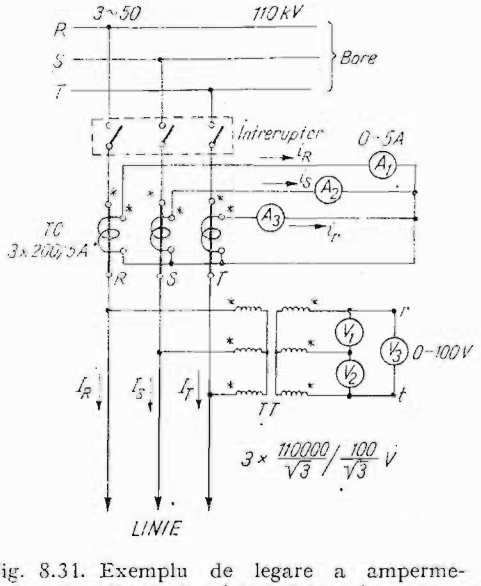


Fig. 8.31. Exemplu de legare a ampermetrelor și voltmetrelor folosind transformatoare de măsură.

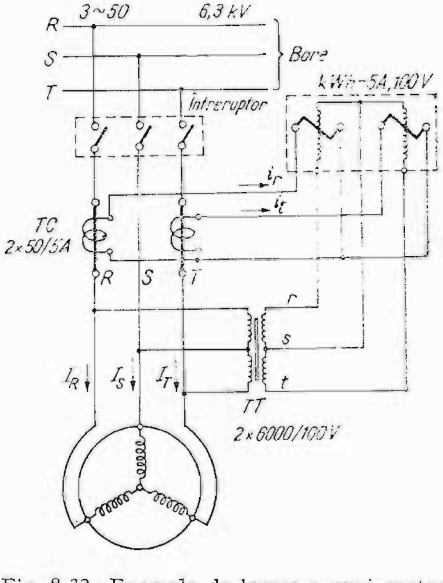


Fig. 8.32. Exemplu de legare a unui contor trifazat folosind transformatoare de măsură.

* Se folosesc trei transformatoare monofazate legate în stea, a căror tensiune între faze este de 110 000 V pe primar, respectiv 100 V pe secundar.

REZUMAT

● Din punctul de vedere al prezentării valorilor măsurate, aparatele de măsurare pot fi: indicatoare, integratoare sau înregistratoare.

● Din punctul de vedere al principiului constructiv, aparatele de măsurare se împart în magnetoelectrice, electromagnetice, electrodinamice, de inducție etc.

● Ampermetrele se leagă în serie pe circuitul de alimentare al consumatorului, iar voltmetrele se leagă în paralel (derivație) pe același circuit.

● Pentru extinderea domeniului de măsurare se folosesc rezistențe suplimentare care se leagă:

— în serie cu voltmetrul (rezistență adițională);

— în paralel cu ampermetrul (șunt).

● Bobinele de curent și tensiune ale wattmetrelor și contoarelor se leagă după aceleași reguli ca și bobinele ampermetrelor, respectiv voltmetrelor.

● Măsurarea rezistențelor se poate face prin următoarele metode industriale:

— metoda voltmetrului și ampermetrului;

— metoda punții Wheatstone.

● Transformatoarele de măsură (de curent și de tensiune) au următoarele avantaje:

— reduc curenții și tensiunile la valori nepericuloase pentru om;

— valorile secundare sînt standardizate ($I = 5$ A sau 1 A și $U = 100$ V) ceea ce permite folosirea unor aparate de măsurare unificate.

VERIFICAREA CUNOȘTINȚELOR

1. Aparatele de tip magnetoelectric pot fi folosite:
   a — numai în curent continuu?
   b — numai în curent alternativ?
   c — în curent continuu și alternativ?
2. Aparatele de tip electromagnetic pot fi folosite:
   a — numai în curent continuu?
   b — numai în curent alternativ?
   c — în curent continuu și alternativ?
3. Rezistențele adiționale se conectează în serie cu:
   a — ampermetrul?
   b — voltmetrul?
   c — wattmetrul?
4. Rezistențele-șunt se conectează în paralel cu:
   a — ampermetrul?
   b — voltmetrul?
   c — wattmetrul?
5. Legarea voltmetrelor la sistemele trifazate se poate face:
   a — numai în stea?
   b — numai în triunghi?
   c — în stea și în triunghi?
6. Transformatoarele de măsură sînt necesare pentru:
   a — reducerea curenților și tensiunilor la valori mai mici?
   b — mărirea sensibilității aparatelor de măsurare?
   c — îmbunătățirea clasei de precizie a aparatelor de măsurare?

CAPITOLUL 9

INSTALAȚII DE LUMINĂ ȘI FORȚĂ

A. NOȚIUNI GENERALE

1. CONSUMATORI DE ENERGIE ELECTRICĂ DE JOASĂ TENSIUNE

O bună parte din consumatorii de energie electrică sînt alimentați la tensiuni mai mici de 1 000 V, numite *tensiuni joase*. Cea mai răspîndită tensiune joasă este cea de 220/380 V (220 V este tensiunea între fază și nul, și 380 V este tensiunea între faze), denumită în mod obișnuit și tensiune de 0,4 kV (400 V). De asemenea, s-a mai folosit (dar este pe cale de dispariție) tensiunea de 120/208 V (120 V pe fază și 208 V între faze).

Consumatorii de joasă tensiune se întîlnesc atît în industrie (consumatori industriali), cît mai ales în locuințe, spitale, creșe, instituții etc. (consumatori casnici), aceștia din urmă asigurînd un trai confortabil oricărui om dintr-o societate civilizată.

În adevăr, astăzi este, practic, de neconceput o existență civilizată fără lumină electrică, radio, televizor, frigider, aspirator, fier de călcat etc., care, după cum se știe, sînt alimentate cu energie electrică.

Instalațiile necesare alimentării consumatorilor de joasă tensiune se găsesc în marea lor majoritate în interiorul clădirilor (instalații electrice interioare) și parțial în exterior (instalații electrice exterioare) și se împart în două categorii distincte:

— *instalații de lumină;*

— *instalații de forță.*

După cum le arată și numele, prima categorie de instalații asigură alimentarea lămpilor electrice de iluminat, iar cea de a doua categorie — a diverselor motoare electrice, cuptoare electrice etc.

Consumatorii de joasă tensiune, numiți și receptoare, se împart în:

— *consumatori monofazați,* ca de exemplu: lampa de iluminat („becul"), televizorul, reșoul, aspiratorul de praf, radioul, fierul de călcat, mașina de spălat rufe, ciocanul de lipit, mașina de găurit portativă și, în general, motoarele ce nu depășesc 2 kW etc.; toate acestea au două conductoare de alimentare

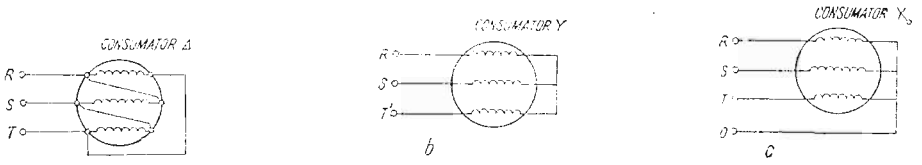


Fig. 9.1. Racordarea consumatorilor trifazați:

a — în triunghi; *b* — în stea fără conductor de nul; *c* — în stea cu conductor de nul.

și se leagă între fază și nul (la tensiunea de fază) adică la 220 V în rețelele de 220/380 V, respectiv la 120 V (110 V) în rețelele de 120/208 V;

— *consumatori trifazați* sînt în general, acele receptoare de puteri cuprinse între 2 kW și 100 kW; în această categorie intră motoarele diverselor utilaje de putere mică și mijlocie (ascensoare, poduri rulante, mașini de frezat, de găurit, de mortezat, prese, strunguri, pompe, ventilatoare etc.). Consumatorii trifazați se racordează la rețeaua trifazată fără conductor de nul (în triunghi — fig. 9.1, *a* sau în stea — fig. 9.1, *b*), sau cu conductor de nul (în stea — fig. 9.1, *c*).

Din cele arătate rezultă, practic, că în general consumatorii casnici sînt monofazați astfel că alimentarea locuințelor este asigurată cu tensiune „monofazată" (între fază și nul), iar consumatorii industriali sînt în majoritate trifazați, deci sînt alimentați cu tensiune trifazată, cu sau fără conductor de nul.

Observație. Un bec de 220 V fiind un consumator monofazat, trebuie să fie alimentat cu tensiunea pe fază din rețeaua de 220/380 V, respectiv nu este permis să se lege între faze în rețeaua de 120/208 V.

2. REȚELE ELECTRICE DE JOASĂ TENSIUNE

Pentru a se asigura alimentarea consumatorilor de joasă tensiune se realizează o rețea electrică de joasă tensiune alimentată prin posturi de transformare echipate cu „transformatoare coborîtoare" (de 6/0,4 kV sau 20/0,4 kV) din sistemul energetic național. Rețelele de joasă tensiune care „distribuie" energia electrică, numite din această cauză și rețele de distribuție, alimentează locuințele (abonații) printr-o „derivație" (ramificație) electrică numită *racord* sau *branșament*.

Constructiv, rețelele de distribuție pot fi:

— *aeriene* (pe stîlp) — caz în care, de obicei, liniile electrice, postul de transformare și branșamentul sînt aeriene. Soluția se aplică în general în mediul rural sau la periferia orașelor;

— *subterane* (în pămînt); liniile electrice și branșamentul sînt în cablu îngropat, iar postul de transformare este subteran. Soluția se aplică de obicei în zonele dens populate ale orașelor.

B. MATERIALE ŞI APARATE FOLOSITE ÎN INSTALAŢIILE ELECTRICE DE JOASĂ TENSIUNE

1. MATERIALE CONDUCTOARE

Materiale conductoare, sau mai simplu spus *conductoare electrice,* sînt materialele metalice folosite pentru circulaţia curentului electric.

Metalele principale folosite în confecţionarea conductoarelor sînt:

— *cuprul,* avînd rezistivitatea $\rho_{Cu} = \frac{1}{57} \frac{\Omega\,mm^2}{m}$;

— *aluminiul,* avînd rezistivitatea $\rho_{Al} = \frac{1}{34} \frac{\Omega\,mm^2}{m}$;

— *oţelul,* avînd rezistivitatea $\rho_{OL} = \frac{1}{8} \frac{\Omega\,mm^2}{m}$.

Variantele constructive ale conductoarelor electrice sînt următoarele: *conductoare neizolate, conductoare izolate, cabluri.*

● **Conductoare neizolate.** Sînt realizate sub formă de conductor unifilar (sîrmă) cu secţiune de 6 ... 16 mm², sau sub formă de conductor multifilar (funie) cu secţiuni de 10 ... 450 mm². Sînt folosite în construcţia liniilor aeriene, inclusiv a branşamentelor.

● **Conductoare izolate.** Se construiesc din cupru sau aluminiu unifilar sau multifilar, cu izolaţie de cauciuc sau material plastic. Dintre acestea cele mai răspîndite sînt:

— conductoarele de cupru cu izolaţie de cauciuc, denumite simbolic conductoare *F 500* (tensiunea maximă de folosire este de 500 V). Secţiunile cele mai folosite sînt 0,75; 1, 1,5; 2,5; 4; 6; 10 ... 400 mm²;

— conductoarele de aluminiu cu izolaţie de cauciuc, denumite simbolic *AF 500,* asemănătoare cu *F 500,* cu diferenţa că sînt din aluminiu;

— conductoarele de cupru sau aluminiu cu izolaţie din PCV, simbol *FY* sau *AFY,* asemănătoare conductoarelor anterioare cu menţiunea că în locul cauciucului se foloseşte material plastic;

— conductoare paralele plate de cupru sau aluminiu avînd cîte două sau trei conductoare din cupru sau aluminiu izolate în PCV şi avînd o manta comună din PCV. Sînt denumite simbolic *FYY* sau *AFYY.* Deoarece acestea se montează direct în tencuială se mai numesc şi conductoare *INTENC.*

● **Cabluri.** Se realizează tot din cupru sau aluminiu avînd:

— două conductoare — cablu monofazat;

— trei conductoare — cablu trifazat;

— patru conductoare — cablu trifazat cu conductor de nul (fir neutru).

Se construiesc în diverse variante, în funcţie de mediul folosit, pentru tensiuni de 0,5; 1; 6; 10; 20 kV, simbolul lor de recunoaştere fiind format din cîteva litere avînd următoarea semnificaţie:

C — conductoare de cupru;

AC — conductoare de aluminiu;

H — izolaţie electrică din hîrtie impregnată;

P — manta de plumb — pentru izolația împotriva umezelii;

B — bandă spirală de oțel — pentru protejarea împotriva loviturilor mecanice;

I — sfoară de iută impregnată în bitum (smoală) — pentru protecția împotriva agenților chimici.

În figura 9.2 se prezintă un cablu trifazat ACHPBI. Se mai construiesc de asemenea cabluri: *CP, CPI, CPB, CPBI, CHP, CHPI* (cupru) sau *ACP, ACPI* ... (aluminiu).

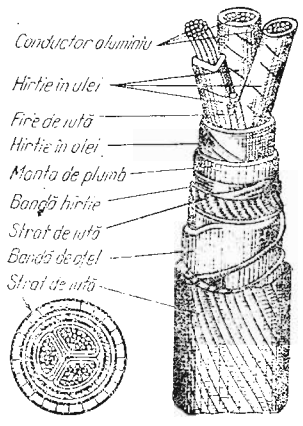


Fig. 9.2. Cablu trifazat ACHPBI.

2. MATERIALE ELECTROIZOLANTE

Materiale electroizolante folosite în industria electrotehnică sînt foarte numeroase, avînd formă: solidă, lichidă sau gazoasă.

Ele sînt caracterizate prin capacitatea lor de izolare, denumită rigiditate dielectrică, care reprezintă valoarea tensiunii care „străpunge" (distruge) un strat de 1 cm grosime din izolația respectivă (v. cap. I).

Aerul uscat este un izolant foarte bun, avînd o rigiditate dielectrică minimă de 2 ... 3 kV/cm.

Uleiul mineral, extras din petrol, cu o rigiditate de circa 30 kV/cm, este folosit la transformatoare, întreruptoare, contactoare etc.

Ebonita, material izolant obținut din cauciuc, sulf și negru de fum, este folosită la construirea carcaselor de aparate și rezistă la circa 300 kV/cm.

Alte materiale izolante folosite în industrie sînt: *bachelita, cauciucul, bumbacul* sau *mătasea impregnată, hîrtia, materialele plastice* etc.

● **Materiale electroizolante în instalațiile electrice de joasă tensiune.**

Izolatoarele de porțelan susțin conductoarele neizolate și se construiesc pentru exterior (fig. 9.3, *a*) sau interior (fig. 9.3, *b*).

Marmura, alcătuită din cristale de carbonat de calciu ($CaCO_3$), se folosește la confecționarea tablourilor electrice.

Banda izolantă (izolierband), obținută din benzi textile impregnate în cauciuc moale (lipicios), se folosește la izolarea înnădirilor conductoarelor.

Tubul Varniș este un material textil impregnat folosind la izolarea capetelor conductoarelor la legarea la aparate.

Azbestul (silicatul de magneziu) este folosit ca izolant la aparatele funcționînd la temperaturi mari (reșou, fier de călcat, radiator etc.).

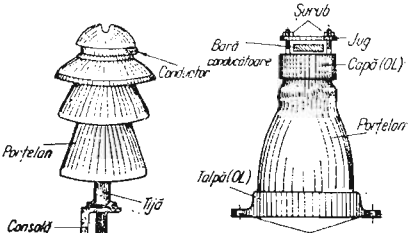


Fig. 9.3. Izolatoare de porțelan: *a* — de exterior; *b* — de interior.

3. TUBURI DE PROTECȚIE

Pentru a fi protejate împotriva loviturilor sau a agenților chimici, a umezelii etc., conductoarele instalațiilor electrice se montează în tuburi speciale de protecție.

Se deosebesc următoarele tipuri principale de tuburi: tub IP, tub P, tub IPE, tub PCV.

Tub IP (Izolat-Protejat) — denumire veche: Bergmann. Este realizat din carton impregnat și tablă și se montează („pozează") sub tencuială.

Tub P (Protejat) — denumire veche: Peschel. Este din oțel și se montează aparent pe perete.

Tub IPE (Izolat-Protejat-Etanș) — denumire veche: Panzer. Are o cămașă de oțel etanșă la praf și umezeală. Se montează aparent.

Tub PCV. Se fabrică în diverse variante, putînd înlocui pe oricare dintre tuburile de mai sus. El este mai ieftin decît tuburile de oțel, însă prezintă dezavantajul de a fi combustibil, ceea ce îl face impropriu pentru mediile cu pericol de incendiu.

4. LĂMPI ȘI CORPURI DE ILUMINAT

a. Lămpi cu incandescență

Se întîlnesc sub denumirea generală însă improprie de „becuri electrice" și au forma constructivă din figura 9.4. Într-un balon de sticlă *1* se găsește un filament *2* (confecționat dintr-un metal greu fuzibil, ca de exemplu wolfram suspendat de cîrligele *3* și alimentat prin doi electrozi *4* sudați la capetele filamentului și la soclul *5*, prin care se alimentează.

Balonul se confecționează din sticlă transparentă (clară), mată, albă lăptoasă sau colorată.

Soclul, realizat din tablă de alamă sau oțel zincat, este lipit de balonul de sticlă printr-un chit special și posedă un filet cu pas mare care permite becului să fie înșurubat în dulia (fasungul) corpului de iluminat.

După mărimea filetului, deci a duliei, se deosebesc: socluri Mignon, socluri Edison și socluri Goliat.

Soclul Mignon — mic, cu diametrul de circa 14 mm — este folosit la becuri de maximum 40 W de tip „lumînare" sau „sferic";

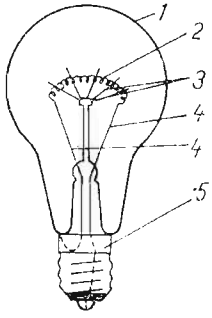


Fig. 9.4. Lampa cu incandescență.

Soclul Edison — normal (ø — 25 mm) — este folosit la majoritatea becurilor (25 ... 500 W).

Soclul Goliat — majorat (ø = 37 mm) — este folosit la becurile foarte mari (1 000 ... 2 000 W).

Lămpile cu incandescență se construiesc de obicei pentru tensiunile de 120 V și 220 V și puteri de 15 ... 1 000 W.

Funcționarea lămpii cu incandescență se bazează pe încălzirea la temperaturi de 2 000 ... 3 000°C a filamentului parcurs de curentul electric (efect Joule-Lenz). Pentru a se evita oxidarea filamentului la asemenea temperaturi, în interiorul balonului de sticlă se introduc gaze inerte (azot, argon etc.).

Randamentul lămpii cu incandescență este realtiv redus, adică numai o mică parte (10 ... 13%) din energia electrică consumată se transformă în radiații vizibile, restul pierzîndu-se prin radiații invizibile și căldură.

Durata de viață a unei lămpi cu incandescență este de circa 1 000 de ore, însă ea scade foarte repede cînd se folosesc tensiuni de alimentare mai mari. De exemplu, dacă tensiunea rețelei este cu 10% mai mare, durata de funcționare a becului scade cu 30%.

În țara noastră se construiesc lămpi electrice cu incandescență la fabrica Steaua Roșie din Fieni — Dîmbovița.

b. Lămpi electrice cu descărcări în gaze și vapori metalici

Lămpile electrice cu descărcări în gaze folosesc radiațiile luminoase („luminescență") produse de un arc electric ce străbate un gaz „monoatomic", cum este: argonul, neonul, heliul, criptonul etc. Razele luminoase se produc ca un efect secundar al stării de plasmă * a gazului dintr-un tub străbătut de arcul electric, datorită fenomenelor de excitare, ionizare și recombinare a atomilor de gaz (v. fig. 10.2).

Lămpile cu descărcări în gaze se construiesc sub forma unor tuburi de sticlă avînd doi electrozi prin care se aplică tensiunea electrică: ele se realizează fie la puteri mici (1 ... 2 W) ca lămpi de semnalizare, fie ca „tuburi luminescente de înaltă tensiune" folosite în instalațiile de reclame luminoase. Tensiunea de aprindere este de circa 300 ... 600 V pe metru liniar de tub.

În figura 9.5 este arătată o reclamă luminoasă (cuvîntul „ELECTRON"). Literele sînt realizate din tuburi cu luminescență, umplute cu gazul corespunzător culorii dorite (portocaliu-neon, verde-cripton, albastru-heliu etc.). Pentru alimentare se folosește un transformator T de tensiune înaltă (de exemplu: 380/6 000 V). Tuburile (literele) se leagă astfel încît să se asigure tensiunea de aprindere (de exemplu dacă tensiunea de aprindere este de

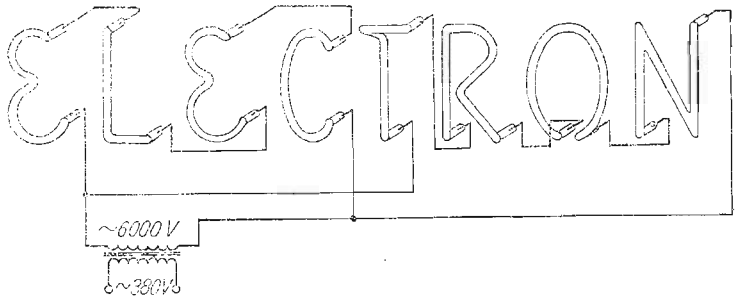


Fig. 9.5. Exemplu de reclamă cu lămpi luminescente.

* Cea de a patra stare de agregare a materiei în care, deși pe ansamblu materia este neutră din punct de vedere electric, în zone relativ mici se află particule pozitive (ioni) și negative (electroni) ale atomilor de gaz care se separă prin fenomenul de *ionizare* și se neutralizează prin *recombinare*.

600 V/m, iar tensiunea de alimentare este de 6 000 V, este necesar ca pe fiecare circuit să se înserieze tuburi totalizînd 10 m, adică $10 \text{ m} \times \frac{600 \text{ V}}{\text{m}} = 6\,000$ V.

În cazul din figura 9.5 s-a presupus că această condiție este îndeplinită dacă se realizează două circuite: unul este circuitul serie $E + L + E + C$, care se leagă în paralel cu cel de-al doilea circuit serie $T + R + O + N$.

Observație. În cazul defectării unui tub, se întrerup (se sting) toate tuburile înseriate, lucru constatat la diversele reclame luminoase.

Lămpile electrice cu vapori metalici cel mai des folosite sînt cele cu vapori de mercur și cele cu vapori de sodiu, care funcționează după același principiu ca și lămpile cu gaze. Aceste lămpi sînt folosite la iluminatul public.

Lămpile cu vapori de mercur dau o lumină alb-albăstruie foarte strălucitoare și au o eficiență luminoasă (randament) foarte ridicată, ceea ce le face apte pentru iluminarea bulevardelor, șoselelor, piețelor publice etc.

Lămpile cu vapori de sodiu au o lumină galbenă neplăcută, însă de o mare intensitate și pătrundere prin ceață, ceea ce face ca acestea să fie folosite și în echiparea farurilor de ceață * ale autovehiculelor.

c. Lămpi fluorescente

Principiul de funcționare. Fac parte din categoria tuburilor cu descărcări în gaze, la care însă radiația luminoasă se datorește în special nu fenomenului de luminescență din tub arătat mai sus, ci unui proces de fluorescență produs de o substanță fluorescentă (luminofor) depusă pe tubul de sticlă.

Astfel, radiațiile electromagnetice de electroni și ioni în timpul descărcării în tub, radiații care în majoritatea lor sînt invizibile (domeniul ultraviolet) produc excitarea stratului luminofor depus pe tub, care emite radiații vizibile luminoase.

În figura 9.6 se prezintă schema electrică a unui tub fluorescent T cu circuitul său de funcționare. La închiderea întreruptorului se aplică tensiune filamentelor f_1 și f_2 ale tubului T, însă descărcarea în gaz nu se produce, tensiunea aplicată, de exemplu 220 V, fiind insuficientă să aprindă tubul, acesta fiind încă rece.

Totodată, tensiunea rețelei se aplică și unui mic tub cu neon S, numit „starter" (pornitor), care la 220 V absoarbe un mic curent (de exemplu $I = 0{,}05$ A). Acest curent încălzește o lamă de bimetal din interiorul starterului, care se îndoaie rapid și face contactul între cei doi electrozi e_1 și e_2 (scurtcircuitează starterul). În această situație, curentul absorbit crește apreciabil (de exemplu $I = 1$ A) și încălzește la incandescență filamentele f_1 și f_2 ale tubului T. Acest lucru provoacă încălzirea gazului din tub (amestec de neon cu vapori de mercur), fapt care asigură reducerea tensiunii necesare de aprindere a tubului. Curentul absorbit, nemaistrăbătînd gazul din starter, acesta se răcește și lama de bimetal desface brusc circuitul. Datorită inductanței L mari a bobinei B plasată în serie pe circuit, ia naștere pentru scurt timp o

* la farurile de ceață se mai folosesc și lămpi cu vapori de iod (halogeni).

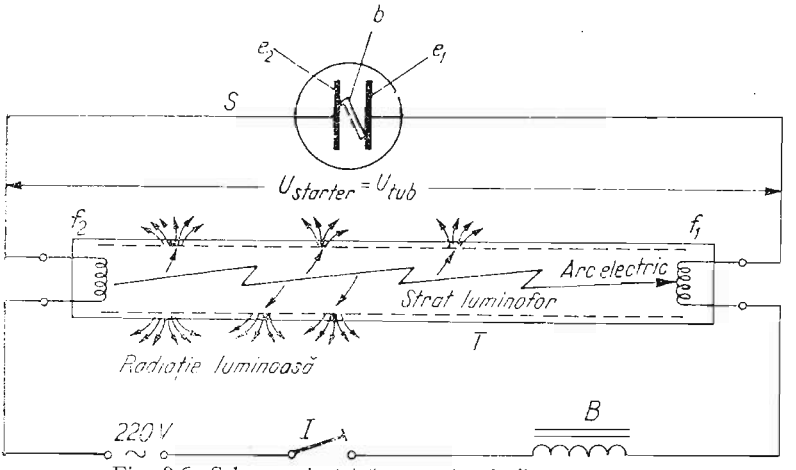


Fig. 9.6. Schema electrică a unui tub fluorescent.

supratensiune * (de exemplu 300 V) care aprinde tubul T, iar acesta luminează. Datorită scăderii tensiunii pe tub (de exemplu la 180 V, căderea de tensiune pe bobina B fiind 40 V) și deci pe starter, acesta nu se mai aprinde atît timp cît tubul funcționează.

Lămpile fluorescente au un randament luminos bun (circa 22 ... 35%), o durată mare de funcționare și oferă o lumină albă asemănătoare celei naturale; prezintă dezavantajul unor variații rapide de iluminare, denumite efect stroboscopic, datorate trecerii prin zero a curentului alternativ (lampa se stinge și se reaprinde de 100 ori pe secundă). Acest fenomen nu poate fi perceput cu ochiul liber, însă are ca efect obosirea vederii; de aceea nu se recomandă să se lucreze (citit sau scris) la lumină fluorescentă.

d. Corpuri de iluminat

Corpurile de iluminat reprezintă acele corpuri electrice în care se fixează una sau mai multe lămpi electrice (sînt numite uneori impropriu „lămpi" după cum lămpile sînt denumite impropriu „becuri").

Corpurile de iluminat au următoarele funcții:

— fixarea în poziția dorită a lămpilor;

— alimentarea cu energie electrică a lămpilor;

— distribuirea (uniformizarea) adecvată a fluxului luminos, corespunzător felului iluminatului;

— evitarea efectului de strălucire (orbire) pe care l-ar produce lampa;

— protejarea lămpii împotriva efectelor dăunătoare ale mediului (praf, umezeală, fum etc.);

---

* După cum se știe, conform legii inducției electromagnetice, într-un circuit tensiunea e care ia naștere este: $e = L \frac{di}{dt}$ în care di este variația curentului în circuit, iar dt este timpul în care s a produs variația curentului respectiv.

— protejarea mediului înconjurător (de exemplu un mediu exploziv) împotriva efectelor dăunătoare ale lămpilor (încălzire excesivă, scîntei electrice etc.);

— realizarea într-o formă estetică (plăcută) a iluminatului interior (de exemplu diverse lustre sau lampadare folosind sticlă de cristal, hîrtie sau mătase pictată etc.).

● **Tipuri de corpuri de iluminat.** Corpurile de iluminat se clasifică:

— **după tipul lămpilor folosite:**

— *corpuri pentru lămpi cu incandescență;*

— *corpuri pentru lămpi fluorescente;*

— **după mediul înconjurător:**

— *corpuri de interior;*

— *corpuri de exterior (aer liber);*

— **după modul de execuție:**

— *execuție normală;*

— *execuție protejată* (de exemplu în hale industriale unde există pericol de loviri mecanice);

— *execuție etanșă* (antideflagrantă sau antigrizutoasă — în medii explozive).

În figura 9.7 sînt reprezentate cîteva exemple de corpuri de iluminat pentru iluminatul interior (fig. 9.7, *a*), pentru iluminatul exterior (fig. 9.7, *b*) și pentru iluminatul special (fig. 9.7, *c*).

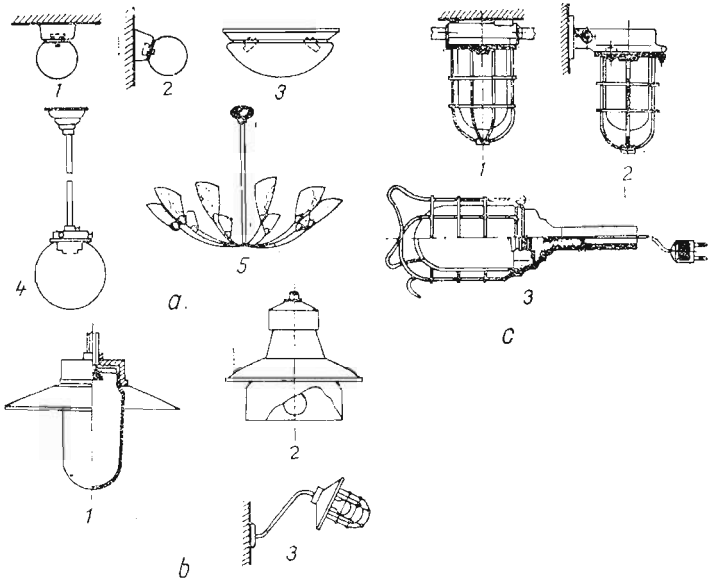


Fig. 9.7. Exemple de corpuri de iluminat:
a — de interior; *b* — de exterior; *c* — speciale.

5. TABLOURI ELECTRICE

Distribuția energiei dintr-un punct pe mai multe circuite electrice este realizată dintr-un tablou electric de distribuție.

● **Elemente constructive.** Tablourile electrice cuprind în principal siguranțele fuzibile pentru fiecare circuit de alimentare, uneori și siguranțe pe circuitul de intrare; de asemenea mai pot cuprinde întreruptoare rotative sau cu pîrghie și aparate de măsură (voltmetru sau ampermetru).

● **Tipuri constructive.** Tablourile de distribuție se clasifică:

— **după putere**:

— *tablouri (de distribuție) monofazate* (cînd puterea distribuită nu depășește 2 kW — de exemplu în locuințe);

— *tablouri trifazate* (pentru puteri mai mari);

— **după natura consumului:**

— *tablouri de lumină;*

— *tablouri de forță.*

Notă. În mod excepțional, în locuințe unde puterile distribuite sînt mici se admite ca de la același tablou să se alimenteze atît circuitele de lumină cît și cele de prize, unde se pot racorda motoare mici de forță (mașini de găurit, mașini de spălat, ventilatoare etc.).

— **după materialul și forma de execuție**:

— *tablouri de marmură;* sînt executate pe plăci dreptunghiulare de marmură de dimensiuni standardizate, marmura constituind partea izolantă pentru tablourile de siguranță. Ca de exemplu, în figura 9.8, *a* se prezintă vederea exterioară a unui tablou de marmură avînd cinci circuite monofazate și două trifazate, care este alimentat trifazat, iar în figura 9.8, *b* — schema electrică a acestuia;

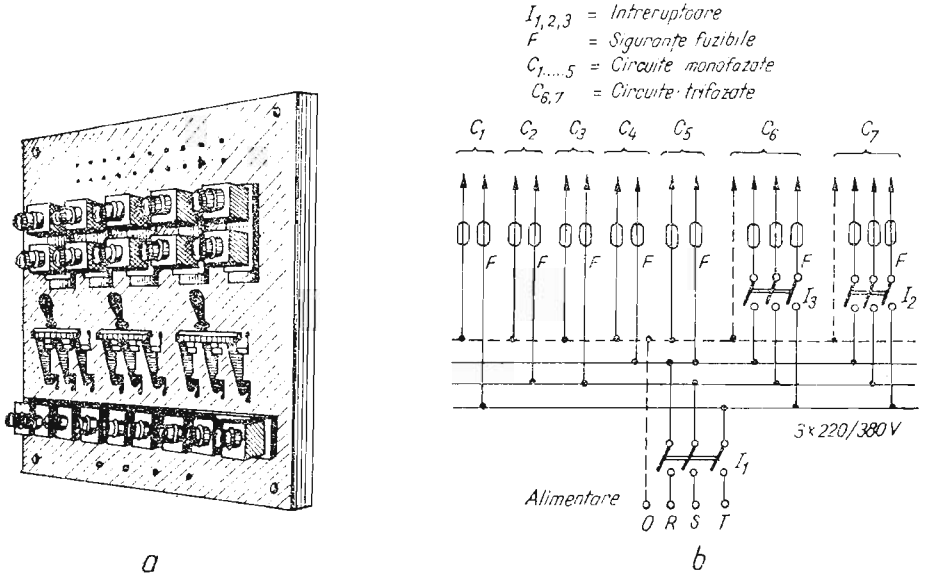


Fig. 9.8. Tablou de joasă tensiune:
a — vedere exterioară; *b* — schema electrică.

— *tablouri de tablă;* sînt realizate de obicei sub forma unor cutii de tablă echipate cu două circuite și sînt folosite în toate apartamentele noi. Uneori acestea cuprind și contorul și o dulie în care se montează lampa de iluminat din holul de intrare unde este plasat tabloul;

— *tablouri metalice deschise;* se construiesc din tablă pe profile de oțel sau tablă ambutisată, pentru puteri relativ mari (sute de kilowați), instalîndu-se în posturi de transformare sau incinte industriale;

— *tablouri capsulate;* sînt realizate din mai multe cutii de fontă cu capac avînd forme dreptunghiulare și diverse funcții (cutii de bare, cutii de siguranțe etc.) și care prin așezare una lîngă alta pot constitui un tablou oricît de mare. Ele se construiesc pentru curenți de 200 ... 600 A, tensiune 0,4 kV și sînt folosite numai în hale industriale unde există pericolul lovirilor mecanice.

C. EXECUTAREA INSTALAȚIILOR ELECTRICE DE LUMINĂ ȘI FORȚĂ

1. SCHEME ELECTRICE

Pentru prezentarea grafică simplă și sugestivă a instalațiilor electrice de lumină și forță se folosesc o serie de „semne convenționale" sau simboluri grafice, pe baza cărora se întocmesc „schemele electrice" ale instalațiilor respective. În tabela 9.1 sînt prezentate cele mai frecvente semne convenționale folosite în schemele electrice ale instalațiilor de lumină și forță (instalații interioare).

Tabela 9.1

Semne convenționale în instalațiile electrice interioare

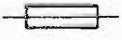
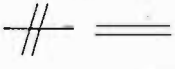
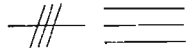
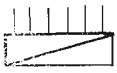
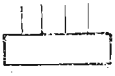
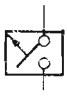
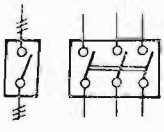
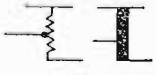
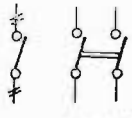
1		linie sau conductă electrică în general
2		încrucișarea a două conductoare fără legătură electrică
3		idem, cu legătură electrică
4		derivație
5		bornă
6		siguranță fuzibilă
7		punere la pămînt
8		circuit (linie, conductă) cu două conductoare cu polarități sau faze diferite

Tabela 9.1 (continuare)

9		circuit (linie, conductă) cu trei conductoare cu polarități sau faze diferite
10		așezarea în tuburi izolate, ușor protejate
11		așezarea în tuburi de protecție etanșe
12		întreruptor unipolar
13		întreruptor bipolar
14		întreruptor tripolar
15		comutator
16		lampă, în general
17		lampă cu incandescență
18		branșament
19		comutator de scară
20		comutator în cruce
21		sonerie
22		buton de sonerie
23		priză monofazată
24		priză cu contact de protecție
25		motor electric de curent alternativ

26		contor de energie activă
27		așezarea în canal de cabluri
28		conductă în care energia merge în jos
29		conductă în care energia merge în sus
30		conductă în care energia vine de jos
31		conductă în care energia vine de sus
32		tablou de distribuție, în general
33		tablou de distribuție capsulat
34		întreruptor în general
35		întreruptor automat în general
36		întreruptor automat tripolar, în ulei
37		transformator cu două bobinaje (monofazat)
38		autotransformator monofazat
39		întreruptor automat bipolar, în aer

Aceste semne convenționale sînt folosite atît pentru proiectarea (alcătuirea) unor scheme electrice aferente unor consumatori dați, cît și pentru „citirea" schemelor și executarea fizică a instalațiilor respective.

În cele ce urmează se vor prezenta cîteva scheme electrice simple.

Exemplul 1. În figura 9.9 se prezintă schema electrică de conexiuni a unei singure lămpi cu incandescență, sub formă reală (multifilară) (fig. 9.9, *a*) și monofilară (fig. 9.9, *b*).

Observație. Nulul (*O*) se leagă direct la lampă, iar faza (*F*) se trece prin intreruptorul monopolar (*I*).

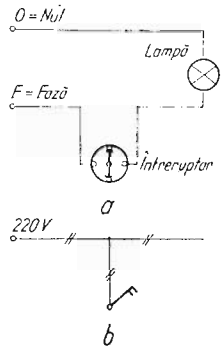


Fig. 9.9. Schema electrică de conectare a unei lămpi:

Exemplul 2. În figura 9.10 se prezintă schema cu două lămpi L_1 și L_2 care pot fi stinse (poz. *1*), se pot aprinde succesiv (poz. *2* și poz. *4*) sau pot fi aprinse amîndouă (poz. *3*).

Exemplul 3. În figura 9.11 este arătată schema de alimentare a unei lămpi L care poate fi aprinsă — stinsă de la două întreruptoare I_1 și I_2 plasate în locuri diferite (lampă de „scară").

Se observă că dacă I_1 și I_2 au pozițiile diferite, lampa L este stinsă, iar dacă amîndouă au aceeași poziție lampa L este aprinsă. Aceasta înseamnă că dacă lampa este stinsă, prin manevrarea oricărui întreruptor lampa se aprinde, și invers.

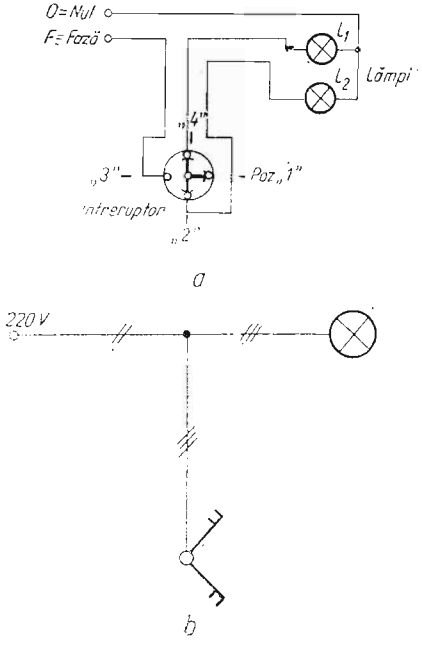


Fig. 9.10. Schema electrică de conectare a două lămpi:
a — multifilară; *b* — monofilară.

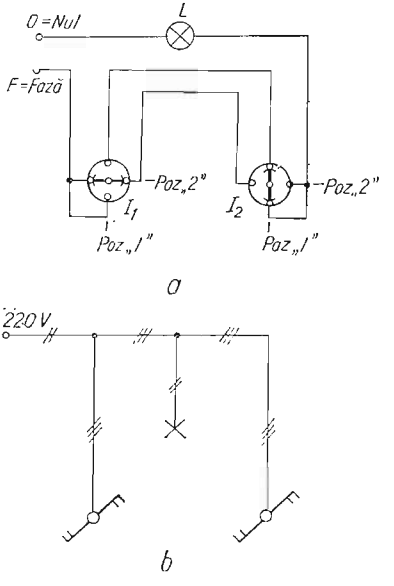


Fig. 9.11. Schema electrică de conectare a unei lămpi prin două întreruptoare:
a — multifilară; *b* — monofilară.

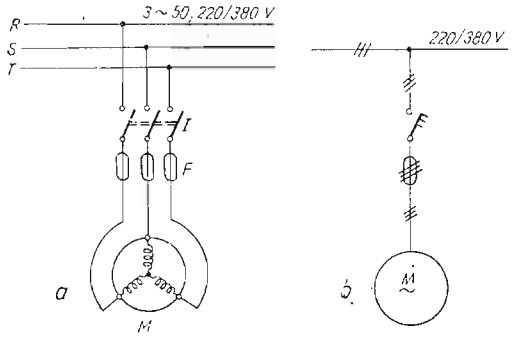


Fig. 9.12. Schema electrică de alimentare a unui motor:
a — multifilară; *b* — monofilară.

Exemplul 4. În figura 9.12 este arătată schema electrică de alimentare a unui motor *M* (folosind siguranțele *F* și întreruptorul *I*) în forma multifilară (fig. 9.12, *a*) sau monofilară (fig. 9.12, *b*).

Exemplul 5. În figura 9.13 este prezentată o schemă monofilară completă de alimentare a unei secții industriale printr-un racord *R* care sosește de la postul de transformare alimentînd un tablou general *TG*, de la care se racordează tabloul de forță *TF* și cel de lumină *TL*. În această schemă completă de execuție se indică:

— puterea instalată — P_i (kW);
— puterea consumată — P_c (kW);
— tipul siguranței/tipul fuzibilului (25/6 A);
— tipul și secțiunea conductoarelor (*F 500*, 4 × 2,5 mm²);
— tubul de protecție (*IPE* ∅ 21 mm).

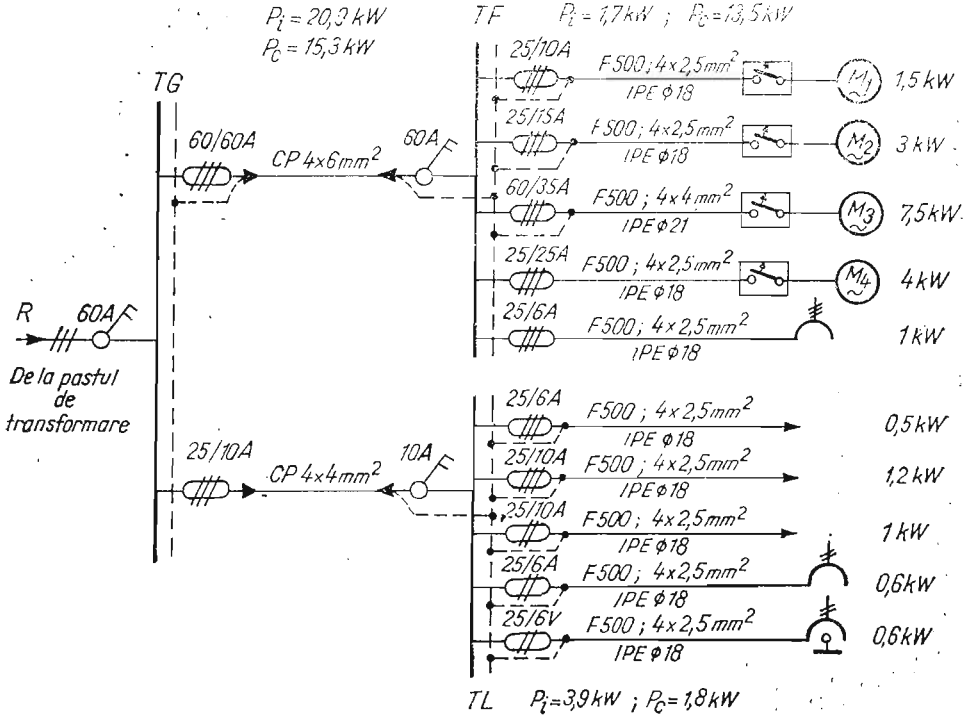


Fig. 9.13. Schema electrică monofilară de alimentare a unei secții.

2. MONTAREA INSTALAȚIILOR ELECTRICE DE LUMINĂ ȘI FORȚĂ

● **Tipuri de instalații electrice interioare.** Instalațiile electrice de joasă tensiune se numesc *interioare* dacă sînt executate în interiorul încăperilor și *exterioare* cînd sînt executate în afara lor (pe străzi, în curți, în pămînt etc.).

Instalațiile *interioare*, care sînt și cele mai răspîndite, se împart în mai multe categorii pe baza diverselor criterii. Astfel:

— **după locul de montare** (pozare):

— *instalații îngropate*, la care conductoarele trase în tuburi de protecție sînt pozate sub tencuială sau sub podea;

— *instalații aparente*, la care conductoarele și tuburile de protecție sînt montate „aparent" pe perete sau console;

— **după mediul ambiant**:

— *instalații în mediu normal* — fără praf, fără vapori corosivi sau fără pericol de explozie (de exemplu în locuințe);

— *instalații în încăperi cu praf necombustibil* (de exemplu la fabricile de ciment);

— *instalații în încăperi cu praf combustibil* (de exemplu la fabricile de mobilă);

— *instalații în încăperi cu praf explozibil* (de exemplu la fabricile de zahăr sau făină);

Atenție! Pulberea (praful) de zahăr precum și cea de făină, într-un anumit raport cu aerul, constituie mediu exploziv.

— *instalații în încăperi cu umiditate;*

— *instalații în încăperi cu agenți chimici corosivi* etc.

● **Branșamente sau racorduri.** Partea din instalație care face legătura între rețeaua electrică de distribuție exterioară clădirii și instalația interioară, din clădire, se numește *branșament* sau *racord*.

În cazul consumatorilor casnici, branșamentul asigură legătura între rețeaua întreprinderii de distribuție a electricității (IDE sau IRE) și instalația din interiorul locuinței.

Branșamentele pot fi: *aeriene* sau *subterane*.

Branșamentele aeriene se folosesc în cazul cînd linia de distribuție este aeriană (pe stîlpi). Intrarea racordului în clădire se poate face în mai multe feluri, în funcție de înălțimea clădirii:

— la clădirile înalte (cu etaj) se folosește soluția cu izolatoare fixate pe perete la o înălțime suficientă (circa 4 m) pentru ca conductoarele să nu fie atinse de pe sol. Conductoarele de legătură, izolate, intră în tubul de protecție ce merge spre interior printr-o cutie etanșă de fontă fixată pe perete;

— la clădirile mai scunde (parter) se prevede un suport din țeavă (consolă) fixat lateral pe perete și suficient de lung pentru a asigura o înălțime convenabilă a conductoarelor față de sol (fig. 9.14);

— la clădiri foarte scunde, mai ales în mediul rural, consola din țeavă metalică pătrunde prin acoperiș.

Pe conductoarele „active" ale branșamentelor aeriene se montează siguranțe aeriene formate dintr-un izolator pe care se fixează capetele conductoarelor separate (izolate) și unite prin firul fuzibil legat între cele două șuruburi.

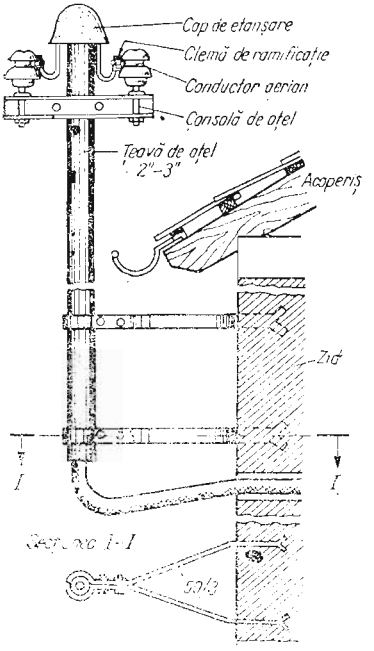


Fig. 9.14. Branșament aerian.

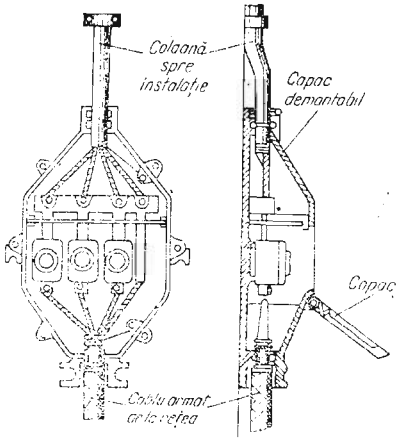


Fig. 9.15. Cofret pentru branșament subteran.

Branșamentele subterane se folosesc întotdeauna cînd rețeaua de distribuție este subterană. Un asemenea branșament este constituit dintr-un cablu subteran monofazat (două conductoare) sau trifazat (patru conductoare) care se racordează la cablul de distribuție (care este totdeauna trifazat) printr-o „mufă de derivație" și se termină în zidul clădirii printr-o cutie specială numită *cofret*. În cofret sînt montate siguranțele branșamentului, iar cofretul este încuiat, accesul la acesta fiind permis numai personalului *IDE* sau *IRE*. În figura 9.15 este arătat un cofret al unui branșament trifazat.

Observație. Siguranțele fuzibile se montează numai pe cele trei faze active (*R*, *S*, *T*), nu și pe firul neutru, care este legat la pămînt.

● **Montarea instalației din clădire.** Înainte de a intra în tabloul general de distribuție a energiei în interiorul clădirii, coloana care sosește de la cofret străbate un aparat de măsurare-contor (v. cap. VIII) care înregistrează energia consumată și pe baza căruia se plătește energia respectivă. Contorul este sigilat și este sub supravegherea, întreținerea și verificarea personalului IDE sau IRE.

De la tabloul general sînt alimentați consumatorii (lămpi, motoare etc.) prin conductoare (*F 500, AF 500 FY* etc.) trase în tuburi de protecție (*P, IP, IPE, PCV* etc.).

Tuburile sînt plasate pe tencuială sau sub tencuială în poziție orizontală, pe pereți, la o distanță de 25 cm de tavan. Derivațiile sau ramificațiile din tuburi spre lămpi, întreruptoare sau prize se execută cu ajutorul unor doze de ramificație de formă rotundă sau pătrată.

Secțiunea conductoarelor pentru circuitele de lumină este de minimum 1,5 mm^2, iar pentru circuitele de priză este de minimum 2,5 mm^2.

Numărul și poziția corpurilor de iluminat, a lămpilor etc. se stabilește în funcție de dimensiunile și destinația încăperii, culoarea pereților etc., pe baza unui „calcul de iluminare".

Întreruptoarele folosite în instalațiile de iluminat se montează în încăperi lîngă ușile de intrare, spre partea de deschidere a acestora (nu după ușă), iar în încăperile mici (băi, spălătorii, cămări) se montează în afara lor, lîngă ușa de acces.

Înălțimea de montare a întreruptoarelor este de 1,5 m de la pardoseală.

Atenție! Este interzisă, deoarece prezintă pericol de electrocutare, montarea întreruptoarelor în băi și spălătorii.

Prizele se montează în încăperile în care sînt necesare (dormitoare, bucătării etc.) fiind legate la tablou pe circuit și deci pe siguranțe separate față de cele de lumină.

În camerele de locuit, prizele se montează de obicei la înălțimea de 20 ... 40 cm de la pardoseală; în bucătării sau cămări prizele pentru frigidere se montează la 1,2 m de la pardoseală, iar în încăperile în care sînt copii (creșe, cămine, spitale de copii, școlii etc.) la 1,5 m.

Priezle montate în bucătării, băi etc. și în general cele care alimentează frigidere, mașini de spălat rufe sau plite electrice (aparate electrocasnice) sînt de tip special (tip „SCHUCO"), avînd și un fir de protecție legat la o centură de pămînt.

REZUMAT

● Consumatorii de joasă tensiune sînt:
— consumatori industriali (puteri mai mari);
— consumatori casnici (puteri mai mici).

● Iustalațiile electrice necesare alimentării consumatorilor industriali și casnici se găsesc în interiorul clădirilor (instalații interioare) și în exteriorul lor (iustalații exterioare).

● Rețelele electrice de distribuție a energiei electrice pot fi cu conductoare pe stîlpi (aeriene) sau în cablu îngropat (subterane).

● Materialele conductoare folosite în instalațiile electrice de joasă tensiune sînt: cuprul, aluminiul și oțelul și au forma constructivă de conductoare neizolate sau izolate și cabluri.

● Materialele electroizolante sînt: solide (porțelan, marmură, lemn, ebonită, hîrtie, azbest, cauciuc, mătase, bachelită, mase plastice etc.); lichide (uleiul mineral etc.) și gazoase (aerul uscat etc.).

● Lămpile de iluminat sînt: cu incandescență, luminescente, fluorescente și cu arc.

● Instalațiile electrice interioare de forță și lumină cuprind: tablouri cu siguranțe, conducte în tuburi de protecție îngropate sau aparente, întreruptoare, prize, lămpi etc.

VERIFICAREA CUNOȘTINȚELOR

1. Un consumator este alimentat trifazat:
   a — dacă este consumator industrial?
   b — dacă este consumator casnic?
   c — în funcție de puterea și tipul receptoarelor?
2. La băi și spălătorii întreruptoarele de lumină se montează:
   a — în interior, lîngă ușă, în partea în care se deschide ușa?
   b — în afara încăperii respective?
   c — în interior, însă la înălțimi mai mari de 1,5 m?
3. Prizele din camerele în care sînt copii (creșe, cămine, școli etc.) trebuie să fie:
   a — prevăzute cu contact de protecție?
   b — la înălțimea de 1,5 m?
   c — desființate?
4. Lămpile (tuburile) fluorescente prezintă față de lămpile cu incandescență avantajul că:
   a — sînt mai indicate pentru a fi folosite la scris și citit?
   b — ocupă un spațiu mai mic?
   c — au eficiență luminoasă (randament) mai mare?
5. Conductoarele INTENC sînt folosite:
   a — numai trase în tuburi etanșe (IPE)?
   b — numai trase în tuburi PCV?
   c — fără nici un fel de tub?

CAPITOLUL 10

COMPONENTE ŞI CIRCUITE ELECTRONICE

A. NOŢIUNI GENERALE

1. OBIECTUL ELECTRONICII

Electronica este acea parte a electrotehnicii care se ocupă de elementele electrice a căror funcţionare se bazează pe fenomenele de conducere a curentului electric prin vid sau gaze, precum şi prin elementele semiconductoare.

Elementele din prima categorie sînt *tuburile electronice cu vid sau gaze,* iar elementele din a doua categorie sînt *dispozitivele semiconductoare* (diode semiconductoare, tranzistoare, tiristoare etc.).

Electronica, care a luat naştere în urmă cu 70 ... 80 de ani, s-a dezvoltat şi continuă să evolueze într-un ritm foarte rapid, datorită avantajelor pe care le oferă aplicaţiile sale în tehnică şi deci în producţie.

Importanţa electronicii se datoreşte, pe de o parte, extinderii foarte mari a domeniului său de aplicaţie, care a cuprins toate ramurile industriale, tehnica sateliţilor artificiali şi a rachetelor etc., iar pe de altă parte, gamei foarte largi de variaţie a mărimilor electrice cu care se lucrează în electronică. De exemplu, există elemente sau montaje electronice care folosesc curenţi de circa 10^{-15} A (aparate de măsurare electrometrice), iar altele — curenţi de 10^4 ... 10^5 A (tuburi redresoare); amplificatoarele de curent continuu lucrează la frecvenţa zero, iar generatoarele de frecvenţe ultraînalte, la tensiuni cu frecvenţa de 10^7 ... 10^8 Hz.

În sfîrşit, tehnica electronică, mereu perfecţionată, permite ca pentru un anumit scop sau funcţie să se realizeze elemente sau aparate cu dimensiuni şi greutăţi din ce în ce mai mici. Astfel, sînt cunoscute astăzi minicalculatoarele de buzunar folosind circuite „integrate", microreceptoarele radio etc.

2. STRUCTURA SISTEMELOR ELECTRONICE

Este foarte dificilă o ierarhizare în structura sistemelor electronice totuşi, pentru studiul acestei discipline complexe şi cu multiple aplicaţii ne vom referi la trei domenii distincte ale electronicii: *componente, circuite* şi *aparate* (instalaţii) *electronice.*

● **Componentele electronice** sînt piese elementare cu funcțiile cele mai simple care intră în componența circuitelor electronice. În această categorie se încadrează tuburile electronice (cu vid sau cu gaze) și elementele semiconductoare (diode, tranzistoare, fotoelemente, tiristoare etc.).

● **Circuitele electronice** sînt ansamble de componente electronice care mai conțin și rezistoare, condensatoare, inductanțe etc. și care îndeplinesc o funcție bine definită în cadrul aparatelor (instalațiilor) electronice. Din această categorie fac parte: redresoarele, amplificatoarele, stabilizatoarele, oscilatoarele, circuitele de impulsuri, circuitele logice, modulatoarele, demodulatoarele etc.

În ultimul timp cunosc o mare dezvoltare circuitele integrate, care pot realiza una sau mai multe din funcțiile circuitelor enumerate mai sus, însă spre deosebire de acestea au structură „integrată" adică elementele componente respective: tranzistoare, rezistoare etc. aferente au fost incluse prin construcție într-o structură unică (o singură piesă avînd mai multe terminale). Este evident că, în caz de defectare a unui singur reper circuitul nu mai poate fi reparat. Circuitele integrate prezintă însă avantajul unor dimensiuni foarte reduse și a unor siguranțe mari în funcționare.

● **Aparatele (instalațiile electronice)** sînt structuri complexe cuprinzînd diverse circuite electronice cu funcții diferite și care în ansamblu servește unui anumit scop. Diversitatea acestor tipuri de aparate este foarte mare și de aceea se vor enumera cîteva aparate electronice: de măsurare, de radioemisie-recepție, de televiziune, de automatizare, calculatoare, de tehnică medicală etc.

B. NOȚIUNI DE FIZICĂ ELECTRONICĂ

1. ATOMUL

Atomul este cea mai mică parte din materie, neutră din punct de vedere electric și care poate intra în combinații chimice.

Atomul este format dintr-un nucleu și din electroni:

ATOM = NUCLEU + ELECTRONI

Electronul este particula elementară de sarcină negativă, avînd masa neglijabilă în raport cu nucleul.

Protonul este particula elementară de sarcină pozitivă. Masa lui este de circa 1 840 ori mai mare decît cea a electronului. El este cuprins în nucleu.

Neutronul este particula elementară neutră (sarcină electrică nulă) avînd masa de o valoare apropiată cu a protonului. El este cuprins de asemenea în nucleu.

În stare normală a atomului, numărul de electroni este egal cu numărul de protoni din nucleu, astfel că atomul este neutru din punct de vedere electric.

Diferitele elemente chimice (fierul, cuprul, siliciul etc.) se deosebesc între ele prin sarcina electrică totală a nucleului atomilor lor, adică prin numărul de protoni.

În afară de electroni, protoni și neutroni, atomii mai cuprind și alte particule elementare (pozitroni, neutrini, mezoni etc.).

Nivelurile de energie. Se demonstrează teoretic că, în cadrul atomului, fiecare electron este plasat la un anumit nivel de energie, care este cu atît mai mare, cu cît electronii sînt mai depărtați de nucleu. La fiecare nivel de energie se pot găsi cel mult doi electroni.

Pentru nivelul de energie al particulelor s-a ales o unitate de măsură specială, *electronvoltul* (eV), deoarece unitățile obișnuite de energie, de exemplu J (joule), au valori prea mari. Se precizează că:

$$1 \text{ eV} = 1{,}6 \cdot 10^{-19} \text{ J}.$$

În figura 10.1 au fost prezentate niveluri de energie W(eV) dintr-un atom de siliciu.

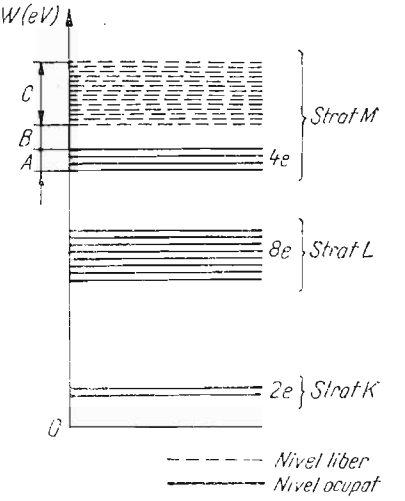


Fig. 10.1. Niveluri de energie într-un atom de siliciu.

Observația *1.* Electronii din straturile interioare (K și L) ocupă cele mai mici (joase) niveluri de energie.

Observația *2.* Electronii din stratul exterior (M) — electronii de valență — ocupă nivelurile energetice cele mai mici (banda A) din stratul respectiv, nivelurile de energie cele mai mari (banda C) rămînînd libere.

2. IONIZARE, EXCITARE, RECOMBINARE

Dacă un electron primește din afara atomului o energie suplimentară, el se îndepărtează de nucleu, trecînd pe un nivel de energie superior.

Dacă energia primită este suficient de mare, electronul se desprinde de atom devenind electron liber, iar atomul se transformă într-un ion pozitiv (ionizare). În figura 10.2, *a* este ilustrată ionizarea unui atom de neon.

Dacă energia primită este mai mică decît energia de ionizare, electronul trece pentru scurt timp pe un nivel liber, apoi revine în starea inițială eliberînd energia primită, sub forma unei raze de lumină (excitarea). În figura 10.2 *b*, este ilustrată excitarea unui atom de neon.

În cazul în care un ion pozitiv întîlnește un electron liber, ei se pot recombina într-un atom neutru (recombinarea). În figura 10.2 *c* este arătată recombinarea unui atom de neon.

3. MATERIALE CONDUCTOARE, IZOLATOARE, SEMICONDUCTOARE

Dacă se analizează din punctul de vedere al nivelurilor de energie ultimul strat de electroni dintr-un atom oarecare aflat într-un cristal de exemplu stratul M dintr-un atom de siliciu), se constată că el este format din trei benzi (zone) (notate în figura 10.3 prin A, B și C) și anume:

— banda A, numită *banda ocupată* sau *banda de valență*, în care se găsesc electronii de valență;

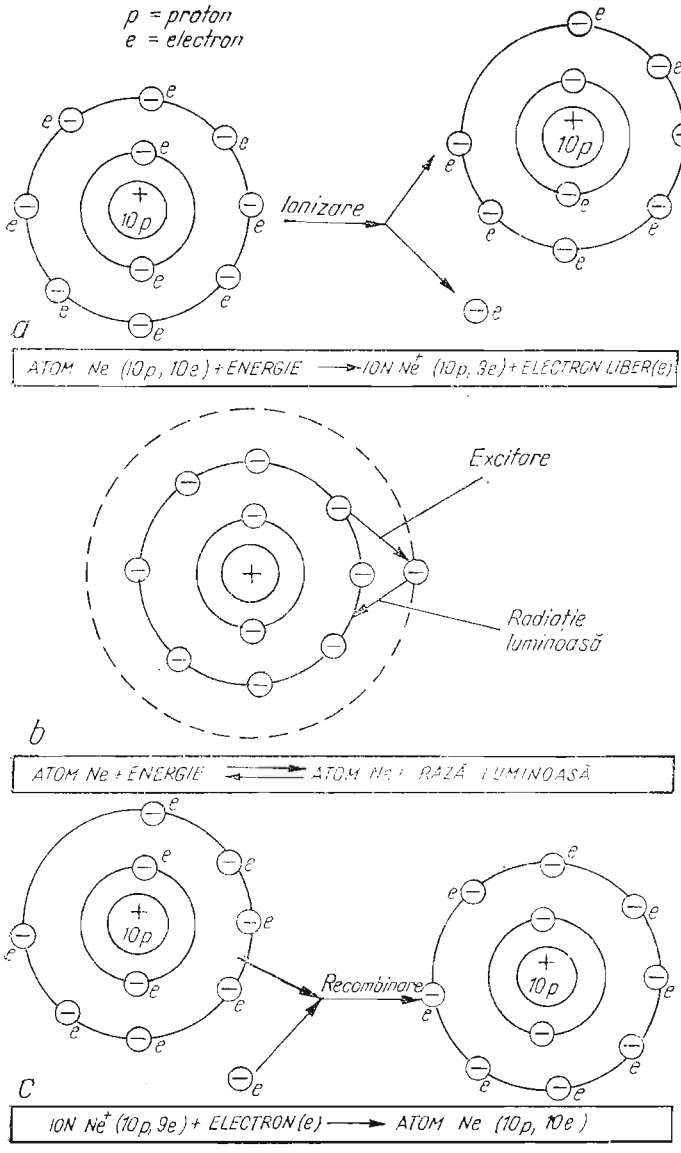


Fig. 10.2. Atomul de neon:
a — ionizare; *b* — excitare; *c* — recombinare.

— banda B, numită *bandă interzisă*, având o lățime ΔW_i(eV), în care nu se află (și nu se pot plasa) electroni;

— banda C, în care nu se găsesc electroni, însă în care pot trece electronii care primesc energii suplimentare; aceasta este *banda liberă* sau *banda de conducție.*

Notă. Mărimea ΔW_i, a benzii interzise deosebește materialele între ele din punct de vedere electric, împărțindu-le în trei categorii: *materiale conductoare, materiale izolatoare* și *materiale semiconductoare.*

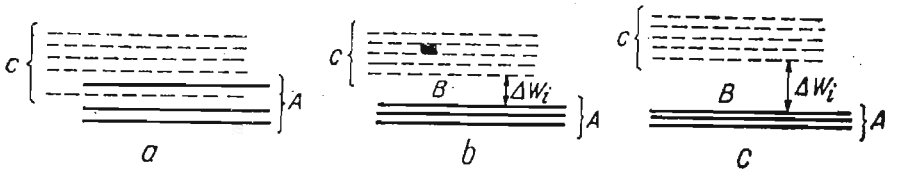


Fig. 10.3. Benzi de energie la materialele electrice:
a — conductoare; *b* — semiconductoare; *c* — izolatoare.
(*A* — bandă ocupată; *B* — bandă interzisă; *C* — bandă liberă).

● **Materialele conductoare** de curent electric *(metalele)* sînt caracterizate prin faptul că banda ocupată *A* și banda liberă *C* se întrepătrund (fig. 10.3, *a*), adică nu există banda interzisă, iar electronii pot trece cu ușurință din banda de valență în banda de conducție, devenind electroni liberi.

În metale există deci, chiar fără a mai fi necesar un plus de energie din afară, electroni liberi. Acești electroni nemaiaparținînd unui anumit atom, se deplasează dezordonat în interiorul metalului. În cazul în care unui conductor i se aplică un cîmp electric exterior (o tensiune electrică), electronii se deplasează cu ușurință în sens contrar cîmpului, formînd un curent electric (v. cap. II) sau, pe baza unor energii primite din afară, ei pot chiar părăsi metalul respectiv, constituind o *emisiune electronică*.

● **Materialele izolatoare** (numite și *dielectrici*) posedă o bandă interzisă relativ mare, de 5 ... 10 eV (fig. 10.3, *c*), din care cauză trecerea electronilor din banda de valență în cea de conducție este foarte dificilă. De aceea, la un material izolator căruia i s-a aplicat un cîmp electric, în mod obișnuit electronii nu se pot deplasa. Se spune că materialul izolator prezintă *rigiditate dielectrică*, adică nu permite circulația curentului electric (v. cap. I).

● **Materialele semiconductoare** se află, din punctul de vedere al conductivității electrice, între materialele conductoare și cele izolatoare; sînt deci semi- (pe jumătate) conductoare. La semiconductoare banda interzisă este relativ îngustă (de circa 1 eV) și în anumite condiții electronii pot trece din banda de valență în cea de conducție (fig. 10.3, *b*).

4. EMISIA ELECTRONICĂ

S-a arătat că în metale o serie de electroni (electronii liberi) se deplasează cu ușurință în întreaga structură a metalului respectiv. Acești electroni nu pot părăsi însă metalul căruia îi aparțin, deoarece sînt reținuți de forțele electrice de atracție care se manifestă la suprafața metalului. Se spune că în calea ieșirii electronilor există o barieră de potențial. Pentru a învinge această barieră, deci pentru a părăsi metalul, electronul va avea nevoie de o anumită cantitate de energie care se va nota cu W_a. Dacă se notează cu W_i energia celor mai rapizi electroni (primii care vor putea părăsi metalul), atunci cantitatea de energie W_0 care trebuie dată acestor electroni rapizi pentru a părăsi suprafața metalului, numită *lucru de ieșire* sau *de extracție*, va fi:

$$W_0 = W_a - W_i. \qquad (10.1)$$

Procesul de ieșire a electronilor din metal poartă numele de *emisie electronică*.

Curentul format de electronii emiși se numește *curent de emisie*.

Elementul electronic care printr-un procedeu oarecare este capabil să emită electroni poartă denumirea generală de *emitor* (care emite).

Energia suplimentară W_0 necesară eliberării electronilor poate fi primită pe diferite căi, în funcție de care emisia se numește emisie *termoelectronică, fotoelectronică, secundară* sau *autoelectronică.*

● **Emisia termoelectronică** este cel mai important tip de emisiune electronică și se produce prin încălzirea unor emitoare speciale, numite catozi termoelectronici (termocatozi). Deoarece curentul de emisie crește cu temperatura de încălzire pentru a se putea obține curenți de emisie mari, la construcția catozilor se folosesc metale cu punct de topire ridicat, cum ar fi wolframul (circa 3 370°C). Peste suportul metalic confecționat din wolfram se așază un strat dintr-un metal activ (oxizi de bariu, calciu, stronțiu etc.), care avînd o barieră de potențial redusă asigură un curent de emisie mare.

● **Emisia fotoelectronică** are la bază fenomenul de scoatere a electronilor liberi din metale pe baza acțiunii luminii, adică prin bombardarea emitorului cu fotoni.

Emitorii folosiți pentru acest tip de emisie electronică se numesc catozi fotoelectronici sau fotocatozi; în construcția lor sînt utilizate metale alcalino-pămîntoase, ca litiul cesiul, rubidiul etc.

● **Emisia secundară** se produce atunci cînd energia suplimentară necesară electronilor pentru a părăsi un metal este transmisă de alți electroni care lovesc suprafața emitorului respectiv. Electronii care bombardează emitorul se numesc electroni primari, iar cei care sînt eliberați în urma bombardării se numesc electroni secundari.

● **Emisia autoelectronică** se obține prin aplicarea la suprafața emitorului a unui cîmp electric foarte puternic (circa 10 kV/m), în caz care bariera de potențial scade, iar electronii pot ieși în afara catodului respectiv. Pentru acest tip de emisie se folosește de obicei catodul de mercur (lichid).

C. TUBURI ELECTRONICE

1. TUBURI TERMOELECTRONICE CU VID

a. Construcție și funcționare

Construcția și funcționarea acestor tipuri de tuburi se bazează pe emisiunea termoelectronică ce are loc într-un spațiu închis (tub) din care s-a scos aerul (vid). Circulația curentului de emisiune în tub are o formă mai simplă sau mai complexă, în funcție de numărul de electrozi ai tubului. Cel mai simplu tub termoelectronic cu vid este *dioda* (doi electrozi); urmează *trioda* (trei electrozi), *tetroda* (patru electrozi) ș.a.m.d.

b. Dioda cu vid

Dioda este fel mai simplu tub electronic. Ea cuprinde numai doi electrozi: catodul și anodul.

Schematic, dioda se reprezintă ca în figura 10.4. Catodul *C*, încălzit indirect de filamentul *f*, emite electroni (emisiune termoelectronică). Aceștia formează

în tub, în vecinătatea catodului, o aglomerare (sau nor) de sarcini negative, numită sarcina spațială a catodului.

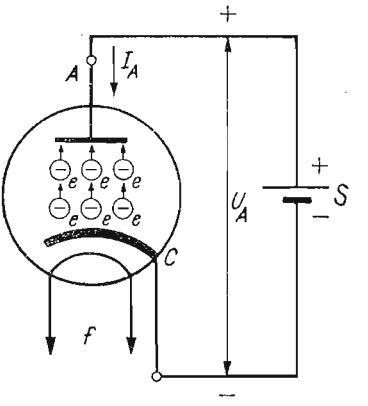


Fig. 10.4. Schema diodei cu vid în regim de conducție.

● **Regimul de conducție.** Dacă se aplică între anod și catod o tensiune continuă U_A ca în figura 10.4 (avînd polul + la anod și polul — la catod), anodul, căpătînd un potențial mai mare decît catodul, va atrage electronii emiși de catod, producînd astfel, atît în interiorul tubului, cît și în circuitul electric exterior, un curent electric I_A.

În acest caz se spune că tensiunea anodică U_A este aplicată în sensul direct, iar curentul anodic care a luat naștere este de asemenea un curent direct. Aceasta constituie funcționarea normală sau regimul de conducție al tubului, regim în care catodul are funcția de emitor, iar anodul — funcția de colector.

Observația 1. Conform convenției stabilite (v. cap. II), sensul curentului I_A se consideră a fi invers sensului real de deplasare a electronilor, adică prin tub curentul circulă de la anod spre catod.

Observația 2. Emisia de electroni a catodului este constantă și regenerează permanent norul de electroni. Cu cît tensiunea anodică este mai mare, din norul electronic pleacă spre anod un număr mai mare de electroni, deci curentul electric I_A va fi mai mare.

● **Caracteristica anodică a diodei.** Între curentul electric I_A, denumit curent anodic, și tensiunea U_A, denumită tensiune anodică, există următoarea lege de dependență, care este cunoscută și sub numele de *legea* 3/2:

$$I_A = KU_A^{3/2} \tag{20.2}$$

în care factorul K este o constantă de proporționalitate.

În figura 10.5, *a* este reprezentată grafic această relație: curba obținută se numește *caracteristica anodică a diodei.*

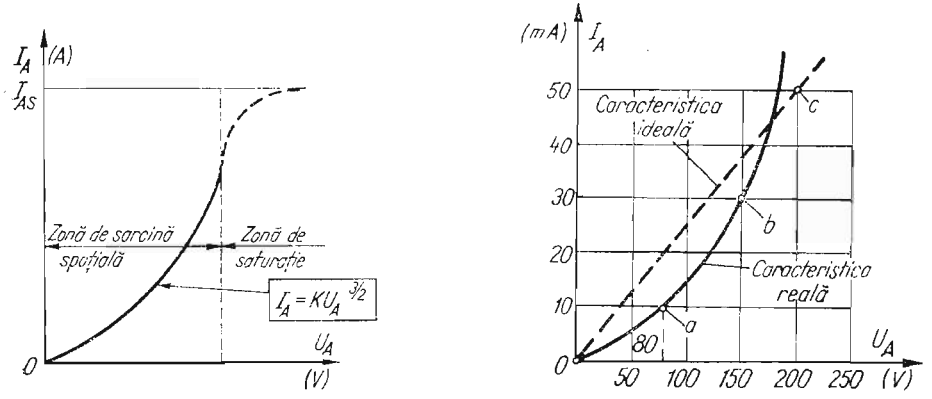


Fig. 10.5. Caracteristica anodică a diodei:
a — caracteristica reală; *b* — *b* — aproximarea caracteristicii.]

Această caracteristică cuprinde o zonă de sarcină spațială, care reprezintă domeniul de funcționare normală a tubului, și o a doua zonă, de saturație, în care oricît ar crește tensiunea anodică U_A, curentul anodic I_A nu depășește o anumită valoare de saturație I_{AS}, numită și *curent direct maxim*, cînd toți electronii emiși de catod sînt atrași de anod.

Observație. În calculul circuitelor cu diode, caracteristica anodică reală poate fi liniarizată, adică poate fi înlocuită cu o linie dreaptă care trece prin origină, numită *caracteristica anodică ideală a diodei* (fig. 10.5, *b*).

Se definește ca *rezistența internă* R_i a diodei raportul dintre tensiunea anodică U_A și curentul anodic I_A pentru un anumit punct de funcționare al tubului *.

Exemplu. În figura 10.5, *b* pentru punctul de funcționare *a* de pe caracteristica reală, rezistența internă este:

$$R_{ia} = \frac{80\ \text{V}}{10\ \text{mA}} = \frac{80\ \text{V}}{0{,}010\ \text{A}} = 8\,000\ \Omega,$$

iar pentru punctul *b*:

$$R_{ib} = \frac{150\ \text{V}}{0{,}030\ \text{A}} = 5\,000\ \Omega.$$

Deoarece valoarea rezistenței interne a unui tub variază cu valoarea curentului ce îl străbate (cu punctul de funcționare), tuburile electronice sînt considerate rezistențe neliniare.

În cazul caracteristicii ideale, rezistența internă (raportul U_A/I_A) este constantă de-a lungul întregii caracteristici, așa cum se observă din figura 10.5, *b*. Ea poate fi determinată în orice punct al caracteristicii. De exemplu, pentru punctul *c*:

$$R_{ic} = \frac{200\ \text{V}}{0{,}050\ \text{A}} = 4\,000\ \Omega.$$

● **Regimul de blocare.** Funcționarea diodei este total diferită în cazul în care polaritatea sursei S se inversează (fig. 10.6), adică plusul se aplică

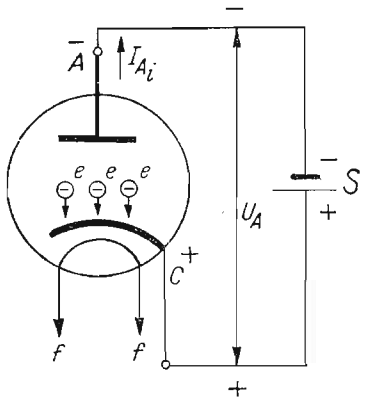


Fig. 10.6. Schema diodei cu vid în regim de blocare.

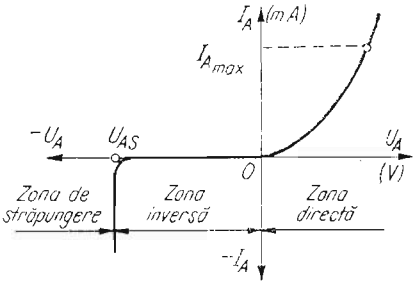


Fig. 10.7. Caracteristica completă a diodei cu vid.

* Rezistența internă este definită exact ca raportul între creșterea tensiunii anodice (ΔU_A) și creșterea curentului anodic (ΔI_A) adică $R_i = \frac{\Delta U_A}{\Delta I_A}$ sau $R_i = \frac{dU_A}{dI_A}$.

la catod. În această situație, deși catodul încălzit emite electroni, aceștia sînt respinși de anod (care este negativ) și sînt atrași înapoi de catod, care este pozitiv. Rezultă așadar că tubul nu conduce, adică curentul anodic este nul. În acest caz se spune că tensiunea anodică a fost aplicată în sens invers. Curentul anodic invers este practic nul, tubul fiind blocat.

Acestui regim îi corespunde zona de blocare a caracteristicii anodice (fig. 10.7), care se confundă cu axa absciselor.

În zona de blocare rezistența internă R_i a tubului este infinită, deoarece $I_A = 0$, iar:

$$R_i = \frac{U_A}{I_A} = \frac{U_A}{0} = \infty. \tag{10.3}$$

Dacă sursa de curent continuu S are tensiunea reglabilă, adică U_A aplicată în sens invers poate fi mărită, se poate găsi o anumită valoare U_{AS} la care, datorită unei emisiuni autoelectronice a anodului, acesta devine emitor (de electroni), iar catodul devine colector (invers decît în funcționarea normală). Ia naștere deci un curent invers, care crește foarte repede, producînd distrugerea (străpungerea) tubului. Tensiunea U_{AS} se numește *tensiune inversă de străpungere* (v. fig. 10.7).

În această zonă de funcționare rezistența internă R_i a tubului devine nulă, deoarece $I_A \to \infty$, iar:

$$R_i = \frac{U_A}{I_A} = \frac{U_{AS}}{\infty} = 0. \tag{10.4}$$

Aplicînd unei diode o tensiune alternativă se obține un curent pulsatoriu, adică practic se realizează o deresare a curentului alternativ. Diodele se folosesc în majoritatea cazurilor ca elemente redresoare, iar în radiofonie sînt utilizate în circuitele de detecție.

c. **Trioda cu vid.**

● **Construcție și funcționare.** Spre deosebire de diodă, trioda are (în afară de anod și catod) o grilă de comandă (fig. 10.8) cu ajutorul căreia se poate varia curentul anodic I_A, chiar dacă tensiunea anodică U_A se menține constantă.

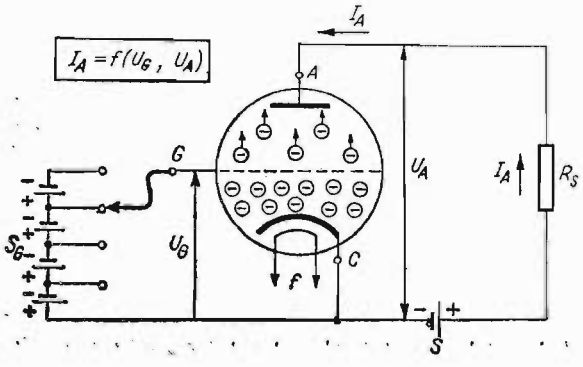


Fig. 10.8. Schema de funcționare a triodei cu vid.

Fiind așezată între catod și anod, adică în drumul electronilor, grila, care de obicei primește un potențial negativ față de catod de la o sursă S_G, se opune (respinge) trecerii electronilor spre anod. Prin grilă reușesc să treacă numai electronii cu energiile cele mai mari, în timp ce o parte din electroni, care, în lipsa grilei ar fi putut ajunge la anod, sînt respinși înapoi, spre catod. Pe măsură ce grila se negativează, adică pe măsură ce tensiunea U_G aplicată între grilă și catod (numită tensiune de grilă) crește în valoare negativă, numărul de electroni ce trec prin grilă scade, respectiv curentul anodic scade.

La un anumit grad de negativare a grilei, deși tensiunea U_A are o anumită valoare pozitivă, toți electronii emiși de catod sînt respinși de grilă, respectiv curentul I_A devine zero. În acest caz tubul se blochează. Tensiunea U_G la care s-a produs blocarea se numește *tensiune de tăiere*.

Rezultă de aici că curentul I_A este o funcție care depinde de două variabile și anume de U_A și de U_G. Reprezentarea grafică a acestei funcții se realizează prin două familii de caracteristici: *caracteristicile anodice* și *caracteristicile de grilă*.

Caracteristicile anodice $I_A = f(U_A)$ pentru diverse valori constante, ale tensiunii U_G sînt reprezentate în figura 10.9. Se observă că pentru $U_G = 0$ se obține chiar caracteristica anodică a diodei, și că pentru valori negative ale tensiunii U_G caracteristicile se deplasează spre dreapta.

Observație. Pentru a se obține același curent anodic, pe măsură ce grila se negativează sînt necesare tensiuni anodice din ce în ce mai mari.

Exemplu. Pentru $I_A = 1{,}7$ mA, la $U_G = 0$ V; -1V; -2 V corespund $U_A = 90$ V; 130 V; 170 V.

Caracteristicile de grilă $I_A = f(U_G)$ pentru diverse valori constante ale tensiunii U_A sînt reprezentate în figura 10.10. Aceste caracteristici se pot obține din cele anodice, dînd diverse valori pentru tensiunea anodică (de exemplu $U_A = 100$ 150, 200 V). Se observă că toate caracteristicile de grilă sînt practic niște drepte, avînd aceeași înclinare (aceeași pantă).

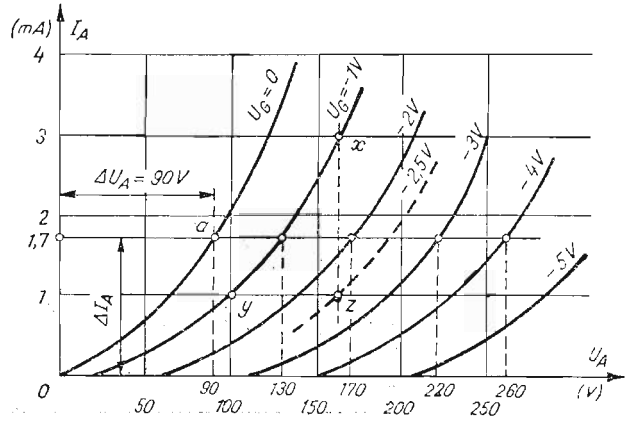


Fig. 10.9. Caracteristicile anodice ale triodei

Observație. Variațiile tensiunii de grilă produc variații mai mari ale curentului anodic (pentru $U_A = ct$) decît pot produce variațiile tensiunii anodice (pentru $U_G = ct$) sau, ceea ce este același lucru, aceeași variație a curentului anodic se poate obține cu o variație mai mică a tensiunii de grilă decît cu a celei anodice.

Exemplu (fig. 10.9). Pornind din punctul notat cu x, pentru a obține o aceeași variație a curentului anodic (de la 3 mA la 1 mA) este necesar ca menținînd $U_A =$ $= 165$ V să se varieze U_G de la -1 V la $-2{,}5$ V (punctul z), sau să se mențină $U_G = -1$ V și să se varieze U_A de 165 V la 100 V (punctul y).

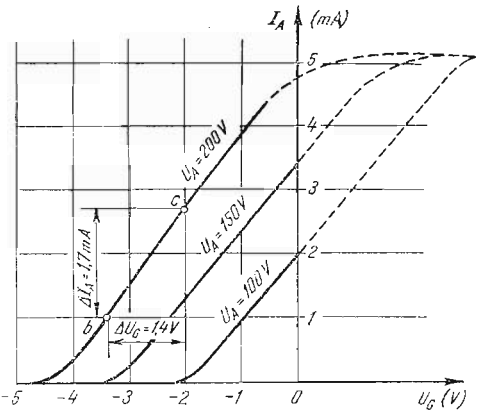


Fig. 10.10. Caracteristicile de grilă ale triodei.

Parametrii triodei sînt: *rezistența internă*, *panta* și *factorul de amplificare*. Raportul dintre creșterea tensiunii anodice (ΔU_A) și creșterea curentului anodic (ΔI_A) pentru U_G constant determină *rezistența internă* R_i a tubului.

Exemplu. În figura 10.9, în punctul a:

$$R_i = \frac{\Delta U_A}{\Delta I_A} = \frac{90 \text{ V}}{1{,}7 \text{ mA}} = 53\,000 \ \Omega.$$

Se definește ca *pantă* S a tubului, raportul dintre creșterea curentului anodic (ΔI_A) și creșterea corespunzătoare a tensiunii de grilă (ΔU_G), pentru U_A constant.

Exemplu. În figura 10.10 considerînd punctele b și c:

$$S = \frac{\Delta I_A}{\Delta U_G} = \frac{1{,}7 \text{ mA}}{1{,}4 \text{ V}} = 1{,}2 \text{ mA/V} = 0{,}0012 \text{ A/V}.$$

Factorul de amplificare A este definit ca raportul dintre creșterea tensiunii anodice (ΔU_A) și creșterea corespunzătoare a tensiunii de grilă (ΔU_G) necesară pentru a menține curentul anodic constant:

$$A = \frac{\Delta U_A}{\Delta U_G}, \text{ pentru } I_A = const. \tag{10.5}$$

Se observă că:

$$R_i S = \frac{\Delta U_A}{\Delta I_A} \frac{\Delta I_A}{\Delta U_G} = A. \tag{10.6}$$

Exemplu. Pentru tubul al cărui caracteristici sînt indicate în figurile 10.9 și 10.10, factorul de amplificare este:

$$A = R_i S = 53\,000 \times 0{,}0012 = 64.$$

Notă. Parametrii tuburilor sînt dați în cataloagele de tuburi sau pot fi determinați grafic cu ajutorul caracteristicilor respective, pe baza relațiilor indicate mai sus.

Triodele sînt folosite la construirea amplificatoarelor, a oscilatoarelor, a releelor etc.

d. **Tuburi cu mai multe grile și tuburi multiple**

● **Tuburi cu mai multe grile.** Dacă la triodă se mai introduce o grilă, numită ecran (E), se obține o tetrodă (fig. 10.11, *a*); dacă tetrodei i se mai introduce o grilă numită supresor (S), se obține o pentodă (fig. 10.11, *b*).

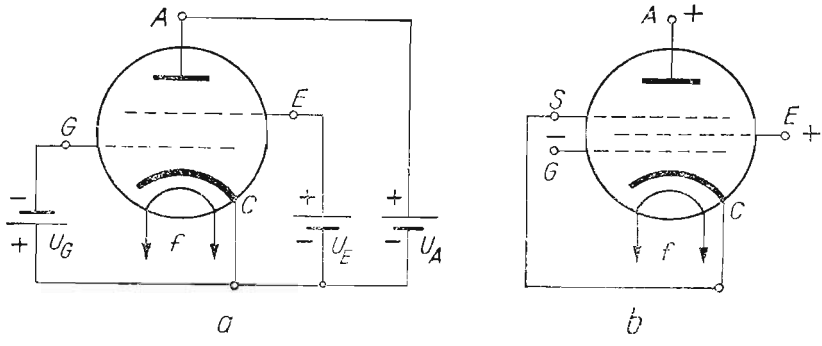


Fig. 10.11. Tuburi cu mai multe grile:
a — tetrodă; *b* — pentodă.

● În afara acestora, se mai construiesc și alte tuburi, de tipuri speciale, numite **tuburi de amestec**, cum ar fi tubul cu șase electrozi (hexodă), șapte electrozi (heptodă) sau opt electrozi (octodă).

Tuburile de amestec sînt folosite în construcția radioreceptoarelor.

● **Tuburile multiple** cuprind într-un singur balon mai multe tipuri de tuburi, realizîndu-se o economie de spațiu și materiale. Astfel, se folosesc *duble diode*, avînd un catod și doi anozi, *duble triode*, *triode-hexode* etc.

3. TUBURI ELECTRONICE CU GAZE (IONICE)

În tuburile electronice cu gaz, curentul electric ia naștere atît prin emisiune electronică (termoelectrică, autoelectronică etc.), cît și prin ionizarea atomilor de gaz aflați în interiorul acestor tuburi. De aici rezultă și numele, de *tuburi ionice* al acestora. Gazele folosite sînt cele nobile (monoatomice) cum sînt: neonul, argonul, criptonul etc., precum și vaporii de mercur.

Principial, tuburile cu gaz sînt asemănătoare celor cu vid, adică cuprind doi sau mai mulți electrozi plasați într-un spațiu închis; deosebirile constau în formele lor constructive și în valoarea puterilor lor, care poate atinge la tuburile ionice sute sau chiar mii de kilowați. Gazele sau vaporii de mercur sînt introduse în tubul din care s-a scos aerul, la presiunea de la 10^{-4} ... 10^{-2} mm Hg.

Tuburile cu gaz se împart în trei categorii importante, și anume: *tuburi termoionice* (cu catod cald); *tuburi cu catod de mercur* (cu catod rece); *tuburi cu descărcare autonomă* (luminescență).

Dintre tuburile termoionice cele mai cunoscute sînt dioda cu gaz (gazotronul) și trioda cu gaz (tiratronul) acestea fiind folosite în circuitele electronice de redresare, precum și la comanda electronică a acționărilor electrice.

Tuburile cu catod de mercur se folosesc la redresarea curentului alternativ pentru instalațiile energetice de puteri mari (de exemplu — tracțiunea electrică).

Tuburile cu luminescență sînt folosite la iluminat (au fost prezentate în capitolul 9).

D. SEMICONDUCTOARE

1. CONDUCTIBILITATEA SEMICONDUCTOARELOR

S-a arătat că la semiconductoare trecerea electronilor din banda de valență în banda de conducție este posibilă datorită faptului că banda interzisă este relativ îngustă. Se creează astfel o pereche: *electron liber* (negativ) și locul rămas liber în atom, numit *gol* (pozitiv).

Numărul de purtători de sarcină (fie de electroni, fie de goluri) crește dacă semiconductoarele pure — cum sînt germaniul sau siliciul (tetravalente) — se impurifică cu cantități foarte mici din anumite elemente, ca arsenul, fosforul (pentavalente), borul aluminiul, indiul (trivalente).

● **Conductibilitatea de tip** *n*. Dacă germaniul (Ge) se impurifică cu arsen (As) atunci, deoarece germaniul are patru electroni de valență, iar arsenul are cinci electroni de valență, fiecare atom de arsen va avea cîte un electron nelegat, covalent, deci liber. Semiconductorul astfel realizat se numește semiconductor de tipul *n*, iar impuritatea se numește *donor* (donează electroni).

● **Conductibilitate de tip** *p*. Dacă germaniul se impurifică cu aluminiu, care are trei electroni de valență, rezultă că fiecare atom de aluminiu aduce un electron mai puțin decît este necesar pentru satisfacerea celor patru covalențe ale germaniului, deci apare un loc gol neocupat de electron (corespunzător celui de al patrulea electron al germaniului). Semiconductorul se numește în acest caz semiconductor de tipul *p*, iar puritatea — *acceptor* (acceptă, primește electroni).

Atenție! Apariția electronilor liberi și a golurilor în semiconductoarele cu impurități nu trebuie înțeleasă în sensul că semiconductorul *n* sau *p* în ansamblu este electrizat negativ sau pozitiv; el este neutru, deoarece în alcătuirea lui intră atomi neutri.

2. DIODE SEMICONDUCTOARE

În cazul unei joncțiuni (lipituri) dintre două semiconductoare de tip *p* și *n*, se obține o diodă semiconductoare (fig. 10.12).

În semiconductorul de tipul *n* există nuclee donoare (notate cu +) și electroni (notați cu —), iar în semiconductorul de tip *p* există nuclee acceptoare (—) și goluri (+). Electronii liberi din semiconductorul *n* și golurile din semiconductorul *p* vor difuza unul spre altul prin joncțiune.

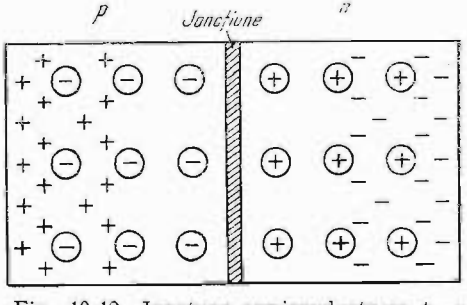


Fig. 10.12. Joncțiune semiconductoare *p*—*n*.

Observație. În realitate, numai electronii trec, deoarece ei sînt liberi, dar plecarea lor din semiconductorul *n*, care

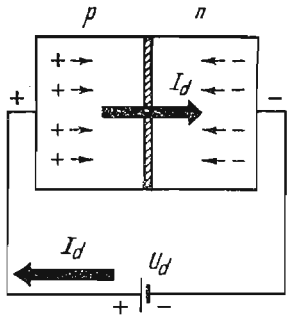


Fig. 10.13. Polarizarea directă a diodei semiconductoare.

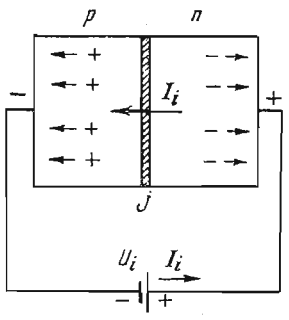


Fig. 10.14. Polarizarea inversă a diodei semiconductoare.

înainte era neutru, face să apară goluri, adică sarcini pozitive necompensate în el; în schimb, dispar goluri în semiconductorul *p*, ca urmare a ocupării lor de către electronii trecuți prin joncțiune, semiconductorul *p* avînd acum un surplus de sarcini negative.

Difuzarea electronilor și golurilor duce la apariția unui cîmp electric îndreptat în sens invers deplasării lor, și ca urmare — la stabilirea unui echilibru dinamic, la care se poate considera că difuzarea a încetat. Trecerea electronilor din semiconductorul *n* în semiconductorul *p* face ca în regiunea învecinată joncțiunii, numărul electronilor liberi din *n* să scadă și în același timp să scadă și numărul golurilor din *p* prin ocuparea lor de către electronii intrați. Această regiune va fi deci mai săracă în purtătorii de sarcină electrică; ea se va comporta ca o rezistență, opunîndu-se trecerii curentului electric. Din această cauză a fost numită strat de blocare sau de baraj; ea are grosimea de circa 10 μ.

● **Polarizarea directă.** Dacă se aplică o tensiune continuă U în sensul numit direct (polarizarea directă), indicat în figura 10.13, *a* (borna + la *p* și borna — la *n*), electrodul pozitiv va atrage electronii din semiconductorul *n* și va respinge golurile din semiconductorul *p*, iar electrodul negativ va acționa invers, adică va atrage golurile și va respinge electronii. Deci cîmpul exterior fiind îndreptat în sensul invers cîmpului de baraj, stratul de baraj se îngustează, rezistența electrică scade și în acest fel prin diodă va circula un curent important, numit *curent direct* (I_d).

Observație. Polarizarea directă a diodei produce o scădere a rezistenței directe a diodei.

● **Polarizarea inversă.** Dacă tensiunea exterioară U este aplicată invers, deci în același sens cu cîmpul de baraj (polarizare inversă), golurile și electronii se îndepărtează și mai mult de joncțiune; grosimea stratului de baraj crește, rezistența crește foarte mult și deci *curentul invers* are o valoare foarte mică, practic zero (fig. 10.14).

Caracteristica de funcționare a diodei semiconductoare (fig. 10.15, *a*) care exprimă dependența curentului I_d față de tensiunea aplicată U_d este asemănătoare cu cea a diodei cu vid (fig. 10.7). Ca și la dioda cu vid, și aici există o anumită valoare a tensiunii inverse (U_i) la care dioda semiconductoare se străpunge.

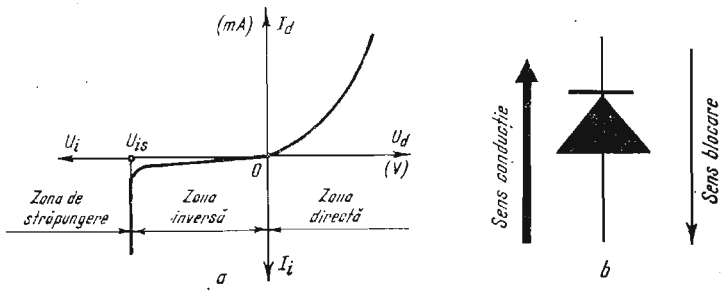


Fig. 10.15. Dioda semiconductoare:
a — caracteristica de funcționare); *b* — simbol grafic.

În figura 10.15, *b* este prezentat simbolul grafic general pentru diode avînd de exemplu indicat alăturat fie tipul constructiv, fie parametrii principali: *curentul direct* I_d și *tensiunea inversă* U_i.

● Diodele semiconductoare se realizează sub următoarele **forme constructive**:

— *diode redresoare cu cuproxid sau seleniu* realizate sub forma unor plăci sau discuri metalice și avînd un strat semiconductor din oxid cupros, seleniu sau sulfură de thaliu;

— *diode monocristaline* (fig. 10.16, *a*) sînt realizate dintr-o joncțiune *p—n* introdusă într-o capsulă metalică. Sensul de conducție este de la electrodul *e* la șurubul *s* care folosește și pentru fixarea diodei. În țara noastră se fabrică (I.P.R.S.-Băneasa) diode monocristaline (cu joncțiune) cu germaniu (tipurile EFR 135 ... 136 — cu curenți direcți I_d de 0,8 ... 7 A și tensiuni inverse U_i = = 50 ... 100 V) și cu siliciu tipurile DR 300 ... 306 (I_d = 0,25 A și U_i = 50 ... 600 V), tipurile F 107 ... 407 (I_d = 0,75 A și U_i = 100 ... 800 V), precum și diode redresoare pentru curenți mari tipurile RA 120 ... 220, KS 1160, și T 31 ... 38 (I_r = 20 ... 300 A și U_i = 100 ... 1 300 V).

— *diode cu contact punctiform* (fig. 10.16, *b*) se realizează sub forma unui contact al unui conductor ascuțit de wolfram *W* care apasă pe un cristal semiconductor *s*. Dintre aceste tipuri de diode numite de semnal și comutație care se pot folosi la frecvențe înalte (radiofrecvență) se realizează în țara noastră tipurile AA 112—131; EFD 103 ... 115 etc. avînd I_d = 20... ... 30 mA și U_i = 25 ... 115 V.

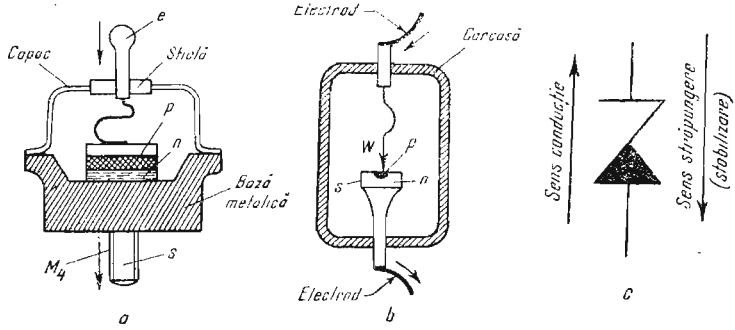


Fig. 10.16. Tipuri de diode:
a — monocristalină; *b* — cu contact punctiform; *c* — simbolul diodei Zener.

Aceste tipuri numite și *stabilizatoare de tensiune* sînt diode semiconductoare din siliciu cu proprietate specifică la conducția inversă. Această proprietate constă în faptul că străpungerea la tensiunea U_i (fig. 10.15, *a*) nu este distructivă ca la diodele obișnuite, ci este reversibilă în sensul că, după străpungere, tensiunea scăzînd sub valoarea U_i dioda se blochează din nou, curentul invers devenind practic nul. Tensiunea U_i de străpungere se numește „tensiune Zener" ($U_i = U_z$) și oricare ar fi valoarea tensiunii inverse mai mare ca valoarea Zener aplicată pe diodă, această tensiune rămîne practic constantă. Așadar, dioda Zener al cărei simbol grafic este reprezentat în figura 10.16, *c* nu este folosită la conducție în sens direct, ci în sens invers, asigurînd astfel procesul de stabilizare a tensiunii ($U_i = U_z = ct$).

În țara noastră se fabrică diode stabilizatoare de tipurile DZ 308 ... 311 avînd $U_z = 8$ ... 11 V, și curentul invers maxim $I_z \leqslant 100$ mA etc.

4. TRANZISTOARE

a. Structura tranzistoarelor

Tranzistoarele sînt realizate din trei straturi semiconductoare *p-n-p* sau *n-p-n*, iar tensiunile sînt aplicate ca în figura 10.17. Tranzistorul (trioda semiconductoare) astfel realizat cuprinde două joncțiuni (fig. 10.17, *a*): o joncțiune J_1 între emitor (E) și bază (B) și o joncțiune J_2 între bază (B) și colector (C). Tensiunea U_{EB} între emitor și bază se numește *tensiune de emitor* și este aplicată în sens direct joncțiunii J_1. Tensiunea U_C între bază și colector se numește *tensiune de colector* și este aplicată în sens invers joncțiunii J_2. Cînd curentul de emitor I_E crește, numărul de goluri în bază va crește, ceea ce va avea ca efect scăderea rezistenței joncțiunii J_2 și deci o creștere a curentului de colector I_C. Se obține astfel un efect de amplificare, asemănător cu cel de la trioda cu vid. Dealtfel, cei trei electrozi ai tranzistorului — emitor, bază, colector — sînt analogi cu electrozii catod, grilă, anod de la trioda cu vid.

În figura 10.17 *b* se prezintă simbolul grafic al tranzistorului *p-n-p* (fig. 10.17, *a*) iar în figura 10.17, *c* — simbolul tranzistorului *n-p-n*.

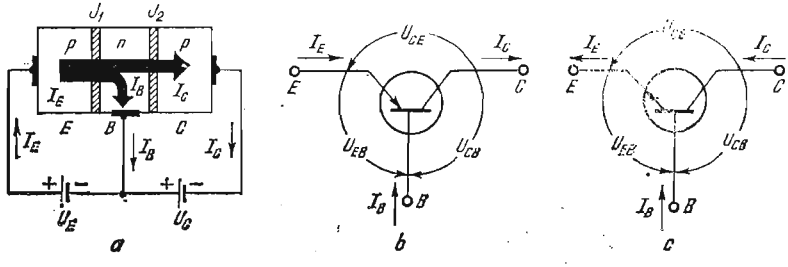


Fig. 10.17. Tranzistoare:
a — structura constructivă *p-n-p*; *b* — simbol grafic *p-n-p*; *c* — simbol grafic *n-p-n*.

b. **Moduri de conectare a tranzistoarelor**

Deoarece tranzistorul are trei borne (E, B și C) în schemele practice el poate fi privit ca un cuadripol (patru poli) la care intrarea și ieșirea au o bornă comună. După cum această bornă este emitorul (E), baza (B), sau colectorul (C) se disting trei moduri fundamentale de conectare a tranzistoarelor:

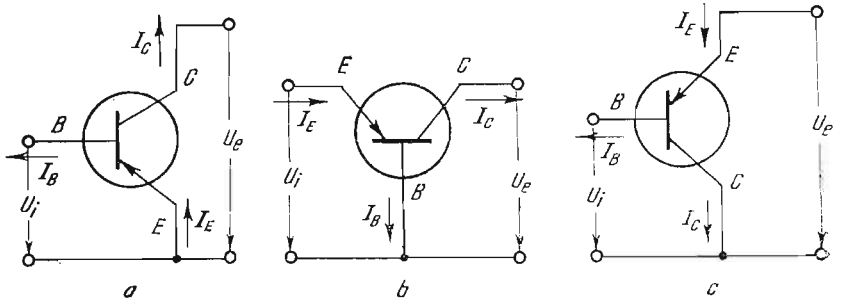


Fig. 10.18. Moduri de conectare a tranzistoarelor:
a – cu emitorul comun; *b* – cu baza comună; *c* – cu colectorul comun.

— *cu emitorul comun* (fig. 10.18, *a*);
— *cu baza comună* (fig. 10.18, *b*);
— *cu colectorul comun* (fig. 10.18, *c*).

După cum se va vedea mai departe, montajul cel mai utilizat este cel cu emitorul comun (fig. 10.18, *a*) care prezintă avantajul unei amplificări mari în tensiune și putere.

c. **Caracteristicile statice ale tranzistoarelor**

Revenind la schemele din figura 10.18 se constată că apar trei curenți (I_E, I_B și I_C) și trei tensiuni (U_{EB}, U_{CB}, și U_{CE}) între care există relațiile lui Kirchhoff:

$$I_E = I_C + I_B; \tag{10.7}$$

$$U_{CE} = U_{CB} - U_{EB}. \tag{10.8}$$

În această situație, numărul mărimilor active care apar la un tranzistor se reduce de la șase la patru (doi curenți și două tensiuni).

Între aceste patru mărimi există două relații caracteristice care pentru tranzistorul în montaj cu emitorul comun (fig. 10.18, *a*) definesc următoarele caracteristici principale de funcționare:

● **Caracteristicile de intrare** (fig. 10.19, *a*):

$$I_B = f(U_{BE}) \text{ pentru } U_{CE} = ct. \tag{10.9}$$

● **Caracteristicile de ieșire** (fig. 10.19, *b*):

$$I_C = f(U_{CE}) \text{ pentru } I_B = ct. \tag{10.10}$$

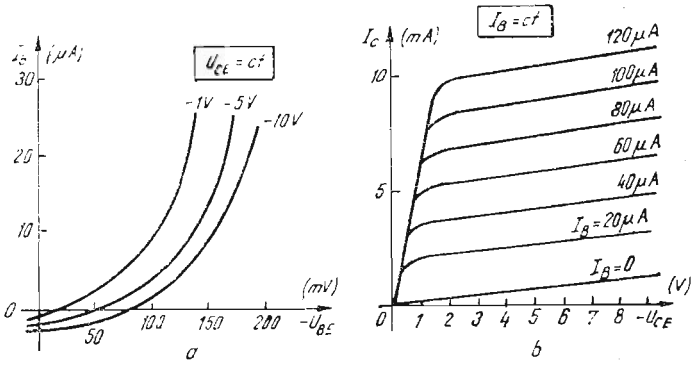


Fig. 10.19. Caracteristicile principale ale tranzistoarelor:
a — de intrare; *b* — de ieșire.

După cum rezultă din figura 10.19, *b*, în regiunea activă aceste caracteristici sînt practic niște drepte paralele și corespund relației:

$$I_C = \beta_0 I_B + I_{CB0} \tag{10.11}$$

în care: β_0 este raportul de transfer în curent direct;

I_{CB0} — curentul rezidual de colector.

Termenul β_0 definește practic amplificarea tranzistorului, motiv pentru care el se mai numește și *factor de amplificare*. Valorile uzuale ale acestuia sînt $\beta_0 = 20 \ldots 200$.

Observație. În figura 10.19, *b* s-a notat în abscisă $-U_{CE}$ pentru următorul motiv. Tensiunea considerată U_{CE} este pozitivă (v. cap. II) cînd $U_C - U_E > 0$ adică potențialul colectorului U_C este mai mare decît cel al emitorului U_E. Însă tranzistorul este în conducție cînd $U_E > U_C$ (v. fig. 10.17, *a*), adică $U_{EC} > 0$, ceea ce implică $U_{CE} < 0$ (negativ).

d. Limitări în funcționarea tranzistoarelor

Pentru ca joncțiunile tranzistorului să nu depășească temperaturi admisibile, ceea ce conduce la distrugerea acestuia, în funcționarea tranzistoarelor se impun o serie de limitări și anume:

— puterea disipată de colector P_d să fie mai mică decît o valoare impusă:

$$P_d = U_{CE} I_C \leqslant P_{d\,max}; \tag{10.12}$$

— tensiunea colector-emitor U_{CE} să fie mai mică decît o valoare impusă (pentru a evita străpungerea joncțiunii bază-colector):

$$U_{CE} < U_{CE\,max}; \tag{10.13}$$

— curentul de colector I_C să fie deasemenea inferior unei valori date:

$$I_C < I_{C\,max}. \tag{10.14}$$

Se observă că relația (10.12) mai poate fi scrisă sub forma:

$$I_C \leqslant \frac{P_{a\,max}}{U_{CE}} \qquad (10.15)$$

care într-o diagramă $I_C = f(U_{CE})$ reprezintă o hiperbolă echilaterală.

În figura 10.20 sînt prezentate caracteristicile de ieșire ale tranzistorului BC 107, împreună cu zona de limitare a funcționării sale. În țara noastră se fabrică în principal următoarele tipuri de tranzistoare (I.P.R.S. — Băneasa).

Tranzistoare de joasă frecvență: tipurile (Ge) AC 180 (*pnp*) — 181 (*npn*) EFT 311 .... 313 (*pnp*); EFT 341 ... 343 (*pnp*); SFT 367 (*pnp*) — 377 (*npn*).

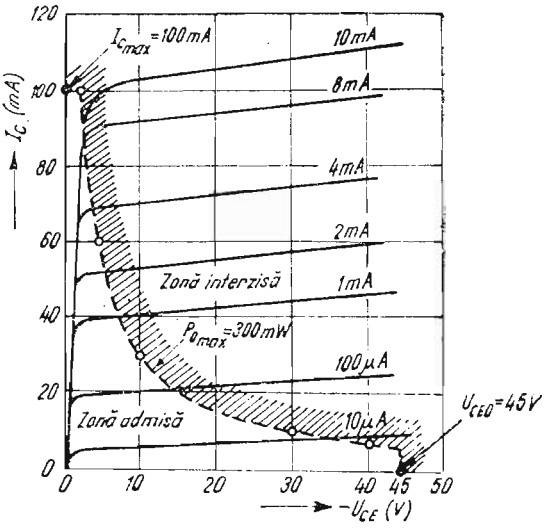


Fig. 10.20. Caracteristicile de ieșire ale tranzistorului BC 107.

Tranzistoare de înaltă frecvență și comutație de tipurile: cu Si: BC101; BC 107 ... 109 (*npn*); BF 173 ... 215 (*npn*); cu Ge EFT 306 ... 308; EFT 317 ... 320 (*pnp*).

Tranzistoare de putere de tipurile (cu Ge): AD 152—155; EFT 212 ... 214; EFT 250; ASZ 15—18 (*pnp*) etc.

5. TIRISTOARE

Tiristorul reprezintă o structură cu patru straturi *p-n-p-n* (fig. 10.21, *a*), avînd deci trei joncțiuni (J_1, J_2 și J_3) și trei borne: anodul A, catodul C și electrodul de comandă G. Tiristorul a cărei reprezentare simbolică este dată în figura 10.21, *b* se comportă ca o diodă semiconductoare — avînd deci un sens de conducție ($A \rightarrow C$), un curent direct I_A și un sens de blocare ($C \rightarrow A$). Caracteristica de funcționare a acestei diode speciale are o formă aparte (fig. 10.22), adică:

— la polarizarea directă, tensiunea U_A crește pînă la o valoare U_{A0}, curentul direct I_A rămînînd practic nul;

— la depășirea valorii U_{A0}, numită *tensiune de deschidere* (amorsare), se produce un fenomen de amorsare (avalanșă de electroni), similar descărcării în tuburile cu gaz cînd curentul crește brusc, căderea de tensiune pe tiristor scăzînd foarte mult.

La reducerea tensiunii U_A tiristorul nu se mai dezamorsează (întrerupe) decît pentru $U_A = 0$ (v. fig. 10.22).

Această caracteristică de funcționare poate fi însă modificată prin aplicare pe electrodul de comandă a unui curent de comandă I_{G1}, I_{G2} ... care

produce reducerea tensiunii de deschidere U_{A01}, U_{A02}, ... pe măsura creșterii curentului de comandă.

La aplicarea tensiunii inverse tiristorul se comportă absolut identic ca o diodă, adică nu conduce în intervalul $U_A = 0 \ldots U_{iS}$ și se străpunge (distruge) pentru $U_A > U_{iS}$.

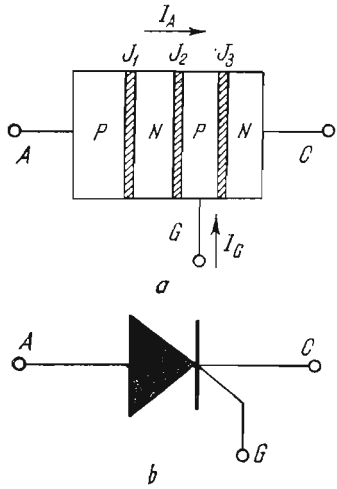


Fig. 10.21. Tiristor:
a — structură constructivă; *b* — simbol grafic.

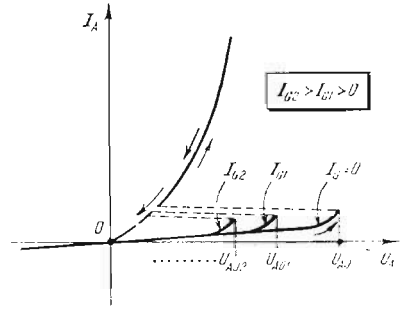


Fig. 10.22. Caracteristica de funcționare a tiristorului.

Datorită acestui mod de funcționare tiristorul se mai numește și *diodă comandată*. El poate fi folosit în circuitele de automatizare ca de pildă în comanda automată a acționărilor electrice unde tiristorul are rolul de redresor comandat (cu curent variabil).

În țara noastră a început fabricarea diverselor tipuri de tiristoare.

În afara componentelor descrise, în practică se folosesc și alte componente electronice semiconductoare cu caracteristici deosebite cum sînt: tranzistoare cu efect de cîmp, termistoare, varistoare, generatoare Hall, diode tunel, fotodiode și fototranzistoare, diode varicap etc.

E. CIRCUITE ELECTRONICE

1. AMPLIFICATOARE

a. Amplificatoare cu tuburi

În construcția acestor amplificatoare se folosesc de obicei tuburile cu vid cu trei electrozi (triode) și tuburi cu cinci electrozi (pentode). Funcționarea acestor amplificatoare se bazează pe posibilitatea de a modifica rezistența

internă R_i a tubului — deci valoarea curentului anodic I_a — prin modificarea tensiunii de grilă, U_g. Modul de funcționare a amplificatorului se poate urmări ușor prin folosirea caracteristicilor de grilă $I_a = f(U_g)$. În general se realizează amplificatoare pentru curent alternativ și, mai rar pentru curent continuu.

● **Schemă simplificată de amplificator de curent alternativ.** În figura 10.23, *a* este prezentată ce mai simplă schemă de amplificator de curent alternativ și caracteristica sa de funcționare.

Tensiunea alternativă u_i, care reprezintă mărimea de intrare, este suprapusă peste tensiunea de negativare E_g a grilei, obținînd tensiunea de grilă u_g:

$$u_g = u_i - E_g.$$

Tensiunea E_g se alege astfel încît să determine punctul static de funcționare S (fig. 10.23, *b*) la mijlocul porțiunii liniare a caracteristicii de grilă. În acest mod, la variația sinusoidală în timp a tensiunii de intrare $u_i (u_i = \sqrt{2}U_i \sin \omega t)$ va corespunde o variație de asemenea sinusoidală i_a a curentului de ieșire ce străbate rezistența de sarcină. Variația în timp a curentului anodic total I_a se poate obține ușor prin puncte, pornind de la valorile tensiunii u_i la momentele de timp 0, t_1, t_2 ... și determinînd valorile corespunzătoare ale lui i_a la aceleași momente. Se observă că curentul I_0 este în permanență pozitiv, ceea ce este normal, întrucît trioda conduce numai în sensul de la anod (*a*) la catod (*c*). Curentul I_a cuprinde componenta continuă I_0, peste care se suprapune componenta alternativă i_a:

$$I_a = I_0 + i_a.$$

I_0 reprezintă deci valoarea de gol a amplificatorului, deoarece corespunde punctului static de funcționare, adică cazului cînd $u = 0$.

Observație. Montajul din figura 10.23 nu se utilizează în mod practic, deoarece prezintă o serie de dezavantaje:

— tensiunea u_i obținută de la un alt element al schemei nu are, în general, exact valoarea tensiunii de grilă a unui tub dat, cuprinsă între punctul de tăiere *t* și cel de saturație *c* (fig. 10.23, *b*). Astfel, dacă u_i este prea mare tubul este suprasolicitat iar curentul i_a este deformat (fig. 10.24, *a*), iar dacă u_i este prea mic tubul nu este rațional folosit (fig. 10.24, *b*);

— rezistența de sarcină R_s este străbătută permanent, și deci încălzită, de componenta continuă I_0;

— rezistența de sarcină R_s nu se adaptează în general la rezistența internă R_i a tubului. Se demonstrează că pentru ca amplificatorul să debiteze puterea maximă pe rezistența R_s este necesară îndeplinirea condiției:

$$R_s = R_i.$$

Această relație reprezintă *condiția de adaptare*.

Deficiențele arătate sînt eliminate prin realizarea unui montaj ca cel din figura 10.25.

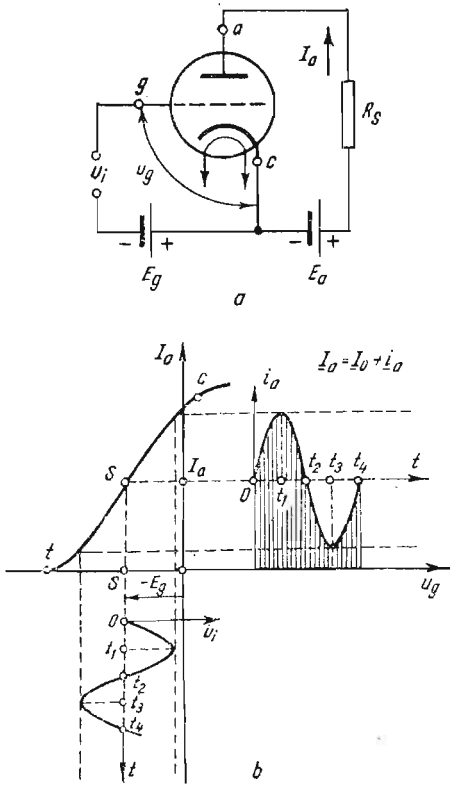


Fig. 10.23. Amplificator electronic cu tuburi:
a – schemă; *b* — caracteristica de funcționare.

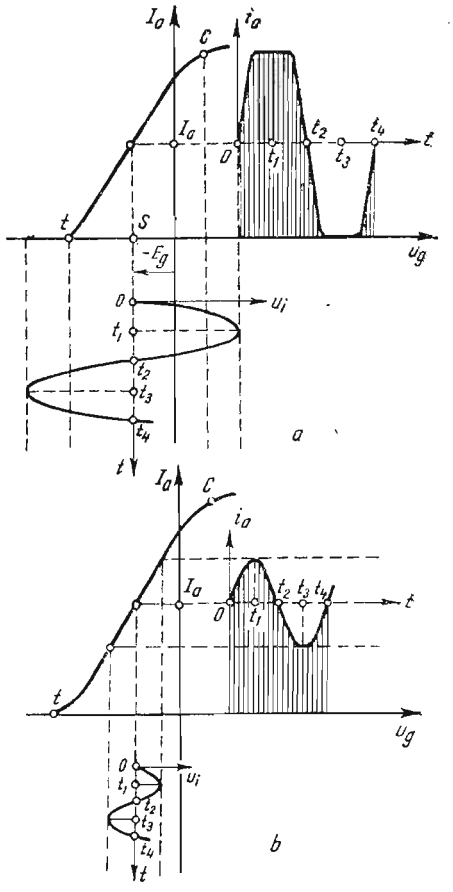


Fig. 10.24. Caracteristicile amplificatoarelor fără adaptare:
a — tub suprasolicitat; *b* — tub subsolicitat.

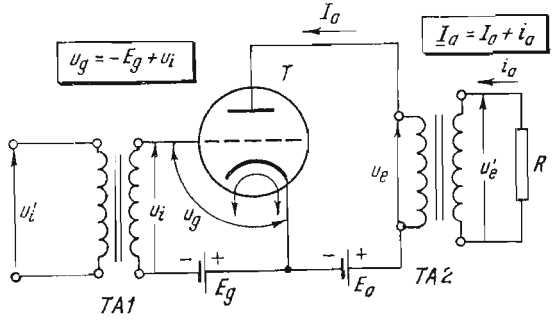


Fig. 10.25. Amplificator electronic cu transformatoare de adaptare.

Scheme practice de amplificator cu triodă

● Montajul cuprinde un transformator de adaptare la intrare TA_1 și altul la ieșire TA_2 (fig. 10.25). Caracteristica de funcționare este aceeași ca în figura 10.23, cu următoarele observații:

— tensiunea de intrare u_i' este transformată cu ajutorul transformatorului TA_1, la valoarea u_i, a cărei amplitudine maximă trebuie să fie cuprinsă între punctele t (de tăiere) și c (de saturație);

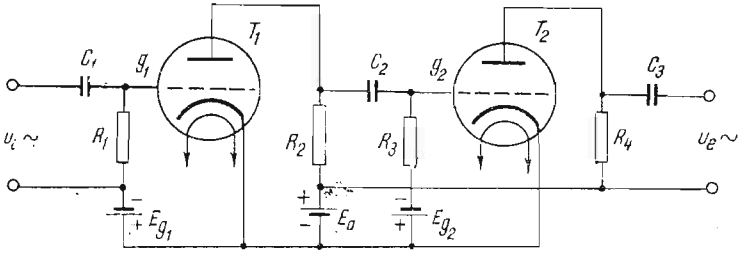


Fig. 10.26. Amplificator în cascadă cu circuit RC.

— curentul i_a ce străbate rezistența de sarcină nu mai cuprinde componenta continuă I_0, deoarece prin transformator nu se transmite decît componenta alternativă;

— circuitul TA_2 plus rezistența R_s trebuie să prezinte o rezistență echivalentă egală cu rezistența internă a tubului T, conform condiției de adaptare.

● Dacă tensiunile de intrare sînt mai mari decît cele necesare tubului, se folosesc în locul transformatoarelor, circuite de adaptare RC, formate din rezistențe R și capacități C. Ca exemplu, în figura 10.26 se prezintă un montaj de amplificator în cascadă cu circuit RC. Se constată că tensiunea de ieșire de pe tubul T_1 care debitează pe rezistența R_2 este aplicată grilei g_2 a tubului T_2.

b. Amplificatoare cu tranzistoare

Datorită avantajelor pe care le prezintă materialele semiconductoare, în prezent capătă o largă răspîndire amplificatoarele cu tranzistoare.

Făcînd o comparație între trioda cu vid (tubul) și trioda semiconductoare (tranzistorul) se constată că, ținînd seamă de principiul de funcționare, se pot face următoarele asemănări:

TUB CU VID	TRANZISTOR
CATOD	EMITOR
ANOD	COLECTOR
GRILA	BAZĂ

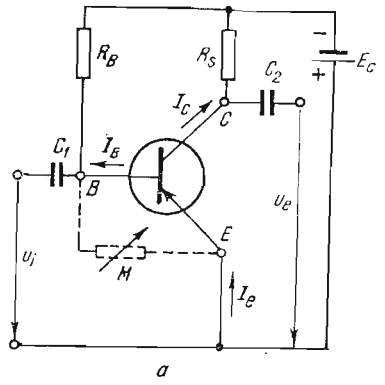
Ținînd seamă de acest fapt, rezultă că și amplificatoarele cu tranzistoare vor fi asemănătoare cu cele cu tuburi.

În figura 10.27, *a* este prezentată schema unui amplificator cu un tranzistor *p-n-p*, la care tensiunea de intrare u_i se aplică între bază (*B*) și emitor (*E*), iar cea de ieșire se obține între colector (*C*) și emitor (*E*).

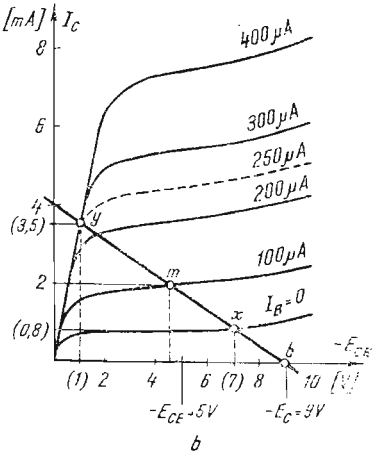
Observație. Cu toată analogia arătată, între tubul cu vid și tranzistorul *p-n-p* există o deosebire fundamentală* și anume: în interiorul tubului, curentul circulă de la anod (colector) spre catod (emitor), în timp ce în interiorul tranzistorului curentul circulă de la emitor spre colector.

Dacă la schemele cu tuburi se are în vedere mai ales amplificarea de tensiune, la schemele cu tranzistoare se utilizează mai ales amplificarea în putere.

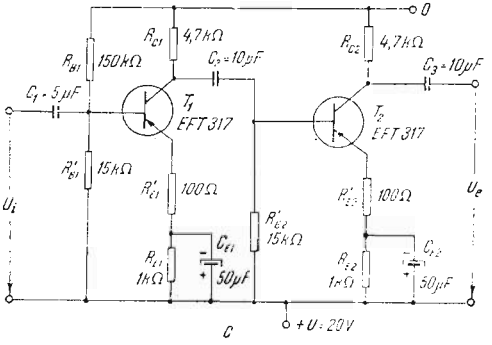
Amplificatoarele cu tranzistoare sînt elemente de dimensiuni foarte reduse și, în raport cu cele cu tuburi, nu necesită surse de energie pentru încălzire (au deci randamentul foarte ridicat); în plus, durata de funcționare mare (practic inuzabile), sensibilitatea mare la puteri mici de intrare, insensibilitatea la șocuri mecanice și praf reprezintă tot atîtea avantaje ale folosirii acestor amplificatoare.



a



b



c

Fig. 10.27. Amplificator cu tranzistor *p-n-p*: *a* — schemă; *b* — caracteristicile de ieșire; *c* — amplificator cu tranzistoare în cascadă.

* La tranzistorul *n-p-n* întrucît sensul mărimilor active sînt inversate rezultă o identitate perfectă între trioda cu vid și tranzistorul *n-p-n*.

Dezavantajele principale ale amplificatoarelor cu tranzistoare sînt *instabilitatea la temperatură* și *zgomotul*.

Temperatura influențează caracteristicile statice ale tranzistorului, în special prin creșterea conductivității acestuia, adică prin creșterea curentului de colector. Astfel, curentul de colector, adică conducția în sens direct a unui tranzistor cu germaniu crește cu temperatura și, de exemplu, la 100°C poate atinge valori de cteva zeci de ori mai mari decît la 20°C. Datorită acestui efect tranzistoarele cu germaniu funcționează satisfăcător pînă la temperatura de 70°C, iar cele care sînt mai stabile, pînă la 150°C.

O metodă de înlăturare a acestei deficiențe constă în montarea unui termistor M între emitorul și baza tranzistorului (desenat punctat în figura 10.27, *a*). Față de situația funcționării normale, dacă temperatura tranzistorului (și deci a termistorului M) crește datorită creșterii temperaturii mediului ambiant, rezistența termistorului scade, producînd creșterea curentului prin termistor. Aceasta are ca efect reducerea curentului I_B în joncțiunea directă emitor-bază, deci reducerea conducției în sensul direct (emitor-colector). În acest mod, s-a realizat compensarea creșterii conducției datorită creșterii de temperatură.

● **Calculul schemelor de amplificatoare cu tranzistoare.** Datorită analogiei între tranzistoare și tuburi electronice este posibilă aplicarea într-o mare măsură a principiilor și a metodelor de calcul ale circuitelor cu tuburi electronice la circuitele cu tranzistoare.

Astfel, se pot elabora scheme similare și pentru amplificatoare cu tranzistoare ca, de exemplu: amplificatoare de curent alternativ și curent continuu, amplificatoare cu unul sau mai multe etaje (în cascadă, în contratimp) etc.

Așa cum am văzut, la realizarea unei scheme de amplificator cu tranzistoare trebuie să se țină seamă de variația curentului de colector I_c în funcție de temperatură, adică să se asigure stabilizarea termică a amplificatorului; de asemenea, este necesară determinarea punctului mediu de funcționare m. Pentru aceasta sînt necesare caracteristicile statice ale tranzistorului (caracteristicile de ieșire) (fig. 10.27, b).

Se observă că caracteristicile de colector sînt analoage caracteristicilor anodice de la tubul cu vid (v. fig. 10.10) curentul anodic i_a (analog lui I_c) în funcție de tensiunea anodică u_a (analog lui E_{CE}), pentru diverse valori ale tensiunii de grilă — U_g (analog lui I_B).

Exemplu. Să presupunem că punctul optim de funcționare a tranzistorului este m (fig. 10.27,*b*) care corespunde la coordonatele $I_c = 2$ mA și $-E_{CE} = 4{,}5$ V și prin care trece caracteristica $I_B = 100$ μA. Curentul I_B reprezintă curentul corespunzător introdus în bază (fig. 10.27, *a*).

Amplificatorul se alimentează de la o sursă de tensiune continuă E_C (de exemplu $E_C = 9$ V); această tensiune se notează pe axa absciselor în punctul *b*. Unind punctul *b* cu *m* se obține dreapta de sarcină. Din figura 10.27, *b* se constată că deoarece $-E_{CE} = 4{,}5$ V, rezultă căderea de tensiune U_S pe rezistența R_S:

$$U_S = E_C - E_{CE} = 9 - 4{,}5 = 4{,}5 \text{ V}.$$

Deoarece curentul de colector trebuie să fie $I_C = 2$ mA, rezultă valoarea rezistenței R_S:

$$R_S = \frac{U_S}{I_S} = \frac{4{,}5 \text{ V}}{0{,}002 \text{ A}} = 2\,250 \ \Omega.$$

Pentru a avea asigurată funcționarea în punctul m în condiția de repaus ($U_i = 0$), este necesară realizarea curentului $I_B = 100\ \mu A$, de unde rezultă valoarea rezistenței R_B din circuitul bazei:

$$R_B = \frac{E_C}{I_B} = \frac{9\ \text{V}}{100\ \mu\text{A}} = 90\ \text{k}\Omega.$$

Domeniul de funcționare a amplificatorului cu un tranzistor din figura 10.27 este cuprins, pe dreapta de sarcină, între punctele x (de coordonate — $E_{CE} = 7$ V și $I_C = 0{,}8$ mA), corespunzător lui $I_B = 0$, și y (de coordonate — $E_{CE} = 1$ V și $I_C = 3{,}5$ mA) corespunzător lui $I_B = 250\ \mu A$.

Se observă că dacă tensiunea de intrare u_i este alternativă, tensiunea de ieșire u_e va fi tot alternativă.

De asemenea se constată că tensiunea de ieșire u_e reprezintă chiar variația tensiunii E_{CE} în jurul punctului de repaus m.

Astfel, de exemplu:

cînd $u_i = 0$: $I_B = 100\ \mu$A, $I_C = 2$ mA, $-E_{CE} = 4{,}5$ V și deci $u_e = 0$.

În semiperioada pozitivă a tensiunii u_i (considerînd sensul pozitiv cînd potențialul emitorului E este mai mare decît potențialul bazei B, deoarece aceasta corespunde polarizării directe a joncțiunii emitor-bază), curentul I_B va crește ($I_B > 100\ \mu$A), $I_C > 2$ mA, $-E_{CE} < 4{,}5$ V și u_e descrie o alternanță pozitivă — considerînd, de asemenea, sensul pozitiv între E și C.

În semiperioada negativă a tensiunii u_i, joncțiunea emitor-bază este polarizată invers și I_B va scădea ($I_B < 100\ \mu$A), $I_C < 2$ mA) — $E_{CE} > 4{,}5$ V și u_e descrie o alternanță negativă.

Pentru obținerea unor amplificări mai mari se folosesc amplificatoare tranzistorizate avînd mai multe etaje de amplificare legate în cascadă. În figura 10.27, c s-a prezentat ca exemplu un asemenea tip de amplificator folosind două tranzistoare *pnp* și avînd indicate valorile concrete ale componentelor.

2. STABILIZATOARE

Aceste elemente asigură menținerea constantă a tensiunii la bornele unei rezistențe de sarcină (stabilizatoare de tensiune-tip derivație) sau a curentului printr-o rezistență de sarcină (stabilizatoare de curent — tip serie —) atunci cînd tensiunea de alimentare variază între anumite limite (de exemplu $\Delta U = \pm 15\%$).

Stabilizatoarele electronice se realizează cu tuburi cu gaz de exemplu: tipul *stabilitron* (de tensiune), tipul *stabilivolt* (stabilizator pentru mai multe tensiuni) sau tipul *baretor* (de curent) precum și cu semiconductoare — cu diode Zener și tranzistoare.

În figura 10.28, *a* este prezentat un stabilizator tip derivație folosind o diodă Zener Z și un tranzistor T.

Față de o situație stabilă cînd tensiunea U_S de la bornele rezistenței de sarcină R_S are valoarea fixă de consemn U_{S0} funcționarea stabilizatorului are loc în felul următor:

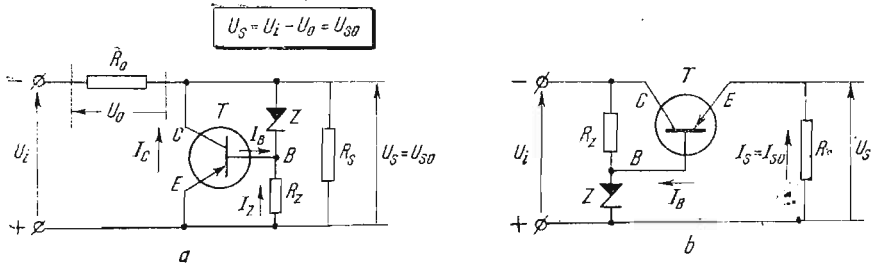


Fig. 10.28. Stabilizator cu diodă Zener și tranzistor:
a — tip derivație; *b* — tip serie.

— La creșterea cu ΔU_i a tensiunii de intrare U_i, tensiunea diodei Zener U_z fiind menținută constantă rezultă o creștere a curentului I_z ceea ce are ca efect o sporire a căderii de tensiune emitor-bază pe tranzistorul $I(U_{EB} = R_z I_z)$. Ca urmare, tranzistorul T se va deschide mai mult datorită creșterii curentului I_B și deci curentul de colector I_C va crește. Creșterea curentului I_c va produce o creștere ΔU_0 a căderii de tensiune U_0 pe rezistența de balast R_0. Deoarece:

$$U_S = U_i - U_0 = U_{S0} \tag{10.16}$$

și întrucît, așa cum s-a arătat mai sus, la o creștere ΔU_i a tensiunii U_i corespunde o creștere ΔU_0 a căderii de tensiune U_0 rezultă că se poate aranja astfel ca cele două creșteri să fie egale:

$$\Delta U_0 = \Delta U_i. \tag{10.17}$$

În acest mod tensiunea U_S la bornele sarcinii se menține constantă:

$$U_S = U_i + \Delta U_i - (U_0 - \Delta U_0) = U_{S0}. \tag{10.18}$$

La scăderea tensiunii de intrare procesul are loc în mod invers.

În figura 10.28, *b* este prezentat un stabilizator tip serie, folosind aceleași clemente principale ca și în cazul precedent. De asemenea, ca și în cazul precedent, funcționarea are loc în felul următor:

— La creșterea cu ΔU_i a tensiunii de intrare, curentul I_S tinde să crească, deci rensiunea $U_S(U_S = R_S I_S)$ va tinde de asemenea să crească, ceea ce va avea ca efect o negativare (scăderea potențialului) a emitorului E față de borna $+$. Întrucît potențialul bazei B este menținut constant în raport cu aceeași bornă de $+$, $(U_{B+} = U_Z)$ rezultă o scădere a tensiunii U_{EB}, deci o scădere a curentului I_B. Ca urmare tranzistorul T se închide mai mult, adică își sporește rezistența internă, ceea ce are ca efect scăderea curentului I_S la valoarea stabilizată I_{S0}.

— La scăderea tensiunii de intrare procesul are loc în mod invers.

3. CIRCUITE DE IMPULSURI

Impulsurile electrice au numeroase aplicații în electronica industrială, fiind folosite în principal pentru transmiterea informațiilor (comenzi, semnalizări, măsurări etc.).

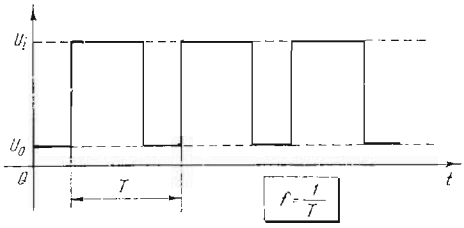


Fig. 10.29. Impulsuri dreptunghiulare.

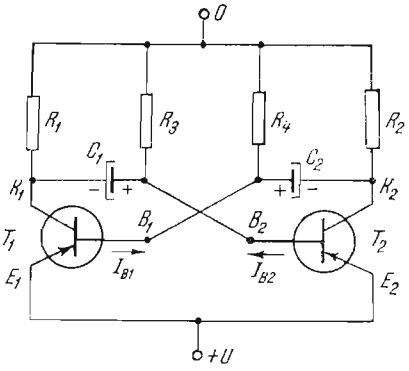


Fig. 10.30. Circuit basculant astabil (oscilator de relaxare).

Impulsurile electrice, de obicei dreptunghiulare (fig. 10.29), sînt caracterizate prin aceea că mărimea produsă variază practic între două valori discrete (U_0 și U_1) cu frecvențe impuse de tipul și parametrii circuitului electronic. Circuitul electronic respectiv poartă denumirea de *circuit basculant*, fiind format în principiu din două tuburi electronice sau două tranzistoare care datorită unor reacții reciproce (încrucișate) pot bascula (de exemplu, cînd un tranzistor conduce, îl blochează pe celălalt și invers).

După modul lor de comportare, circuitele basculante se clasifică în următoarele tipuri principale: *astabile, bistabile, monostabile* etc.

● **Circuitul basculant astabil** (fig. 10.30) este caracterizat prin aceea că trece automat dintr-o stare într-alta acest proces nefiind provocat din afară, frecvența și durata impulsurilor fiind determinate în principal de caracteristicile rezistoarelor $R_1 \ldots R_4$ și ale condensatoarelor C_1 și C_2. Circuitul astabil este de fapt un oscilator RC de oscilații dreptunghiulare, motiv pentru care se mai numește și *oscilator de relaxare*. Funcționarea circuitului astabil are loc în felul următor (fig. 10.30) — s-a presupus că condensatoarele C_1 și C_2 sînt electrolitice:

Să presupunem că, anterior observării fenomenului, tranzistorul T_1 era în saturație și deci tranzistorul T_2 era blocat. În această stare, baza lui T_1 (deci punctul B_1) s-a aflat la potențialul $+U$, iar colectorul lui T_2 (punctul K_2) prin rezistența R_2, la potențialul 0 (masa), adică condensatorul C_2 este încărcat la tensiunea U.

Observație. Timpul de încărcare a condensatorului C_2 a fost determinat de constanta de timp τ_2 a circuitului R_2, C_2 ($\tau_2 = R_2C_2$).

În momentul inițial, condensatorul C_1 fiind complet descărcat, joncțiunea emitor-bază ($E_2 - B_2$) a lui T_2 este polarizată direct ($I_{B2} > 0$), deci T_2 începe să conducă intrînd în saturație. În această stare, K_2 capătă potențialul lui E_2 deci, C_2 fiind încărcat, armătura sa pozitivă (deci punctul B_1) devine mai pozitivă decît $+U$ și, ca urmare, joncțiunea E_1-B_1 este polarizată invers ($I_{B1} = 0$). Ca urmare T_1 se blochează, ceea ce are ca efect începerea încărcării condensatorului C_1 pe circuitul $+U \rightarrow E_2 \rightarrow B_2 \rightarrow (C_1) \rightarrow K_1\ (R_1) \rightarrow 0$ (constanta de timp $\tau_1 = R_1C_1$). În același timp, C_2 încărcat la tensiunea U însă acum scurtcircuit prin rezistențele $R_4 + R_2$ începe să se descarce pe acestea

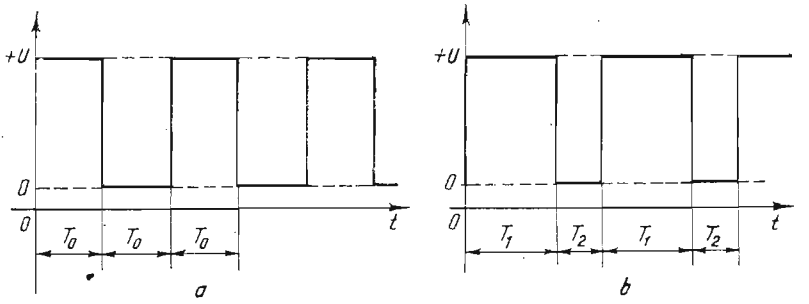


Fig. 10.31. Diagrama impulsurilor produse de un oscilator:
a – simetric; *b* – asimetric.

(constanta de timp $\tau_4 = C_2 (R_2 + R_4)$). În sfîrșit, cînd C_2 este complet descărcat, B_1 revine la potențialul 0 (prin R_4), apare $I_{E1} < 0$, deci tranzistorul T_1 intră în conducție și sistemul basculează invers (T_2 se blochează) ș.a.m.d.

Considerînd ieșirea circuitului punctul K_1 (sau K_2) se observă că acesta se află succesiv la potențialul $+ U$ cînd T_1 este în saturație (T_2 blocat) respectiv la potențial 0 cînd T_1 este blocat (T_2 în saturație).

Observație. Dacă $C_1 = C_2$, $R_1 = R_2$ și $R_3 = R_4$ impulsurile $+U$ și 0 au durate egale (fig. 10.31, *a*) și circuitul instabil se numește *simetric*; în caz contrar (fig. 10.31, *b*) el se numește *asimetric*.

● **Circuitul basculant bistabil** (fig. 10.32) este asemănător ca structură și funcționare cu cel astabil, însă, spre deosebire de acesta, el nu oscilează, ci rămîne permanent (stabil) într-o anumită stare (de exemplu T_1 blocat și T_2 saturat), trecînd în cealaltă stare (T_1 saturat și T_2 blocat) de asemenea stabilă la primirea unui impuls din afară. De exemplu, aplicînd la intrare un impuls $+ U$ pe baza B_1 a tranzistorului T_1 joncțiunea E_1-B_1 este polarizată invers ($U_{E1} > U_{E1}$) deci T_1 se blochează. Curentul I_2 [$+ U \rightarrow (R_4) \rightarrow B_2$ $(R_5) \rightarrow K_1 \rightarrow (R_1) \rightarrow 0$] asigură un potențial rezidual în punctul B_2 care este mai negativ decît potențialul în E_2, deci T_2 intră în conducție și rămîne stabil în această poziție. În consecință tensiunea de colector a lui T_2 fiind practic nulă K_2 cu E_2 (și E_1) au același potențial U_0, mai negativ decît $+ U$ ($U_0 = R_0 I_0$), în timp ce curentul I fiind practic nul, B_1 are potențialul $+U$.

Se observă că joncțiunea E_1-B_1 este polarizată invers ($U_{E1} > U_{E1}$) ceea ce asigură blocarea lui T_1.

Se observă în concluzie implicațiile:

$$T_1 \text{ blocat} \rightleftarrows T_2 \text{ saturat.}$$

Dacă se aplică un impuls $+U$ pe baza B_2, bascularea are loc invers sensului, rămînînd stabil și în această poziție.

$$T_2 \text{ blocat} \rightleftarrows T_1 \text{ saturat.}$$

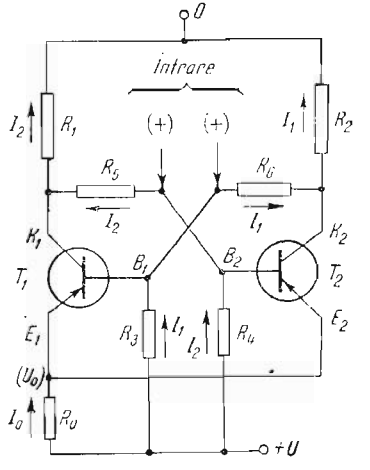


Fig. 10.32. Circuit basculant bistabil.

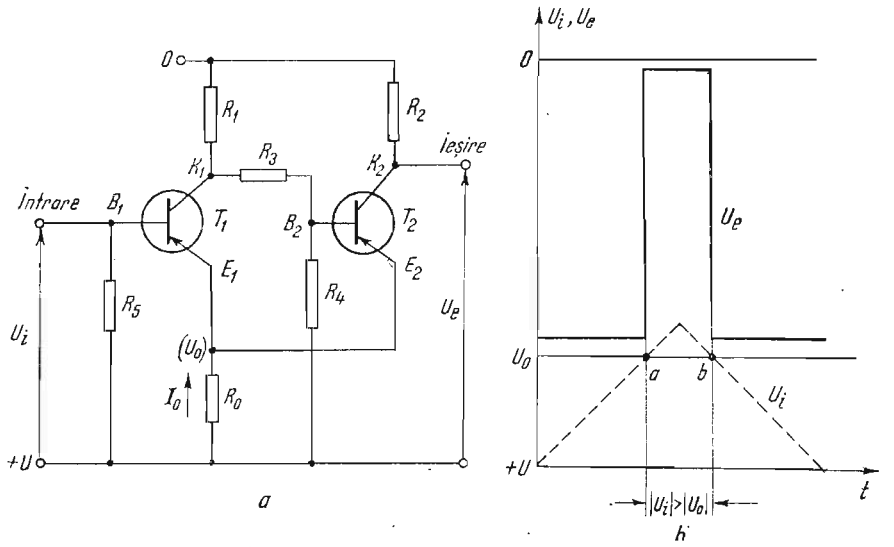


Fig. 10.33. Circuit basculant monostabil:
a — schema electronică; *b* — diagrama impulsurilor.

Ieșirea circuitului basculant bistabil poate fi obținută fie de la K_1 fie de la K_2 care pot avea succesiv potențialele U_0 sau ≈ 0.

● **Circuitul basculant monostabil** (fig. 10.33, *a*). Prin întreruperea unei legături de reacție a unui bistabil acesta devine un circuit basculant monostabil, caracterizat prin aceea că, spre deosebire de bistabil, acesta posedă o singură stare stabilă, și anume bascularea are loc numai atunci cînd se menține un semnal de intrare ce depășește o anumită valoare de consemn.

Observație. Circuitul din figura 10.33 este identic cu cel din figura 10.32, la care $R_6 = \infty$ (întreruptă reacția).

În stare normală, adică atunci cînd tensiunea de intrare U_i este nulă, circuitul se află în poziția stabilă, care, ca și în cazul precedent, este (v. fig. 10.32):

$$U_i = 0 \rightarrow T_1 \text{ blocat} \rightarrow T_2 \text{ saturat.}$$

Valoarea semnalului de basculare este chiar $U_0 (U_0 = R_0 I_0)$ adică potențialul rezidual creat pe emitorul E_1 cînd T_2 este în conducție. Cînd U_i crește (în valori negative) curentul I_1 crește, baza B_1 se negativează pînă ce $U_i = U_{B1} < U_{E1} = U_0$ cînd tranzistorul T_1 se deschide și intră în saturație. Prin legătura de reacție ($K_1 \rightarrow B_2$) tranzistorul T_2 se blochează, adică se produce bascularea:

$$T_1 \text{ saturat} \rightarrow T_2 \text{ blocat.}$$

La dispariția tensiunii de intrare circuitul revine în starea stabilă inițială. Ieșirea circuitului (tensiunea U_e) se realizează din punctul K_2 (sau K_1) pe care, ca și în cazul precedent, se obține (fig. 10.33, *b*):

$$U_i > U_0 \rightarrow |U_i| < |U_0| \rightarrow U_e \approx U_0;$$

$$U_i < U_0 \rightarrow |U_i| > |U_0| \rightarrow U_i \approx 0 \text{ (inrervalul } a\text{-}b).$$

În afara circuitelor electronice prezentate, în industrie se mai folosesc și alte tipuri de circuite, funcționarea unora dintre ele urmînd a se prezenta în cadrul capitolului XI unde se vor arăta unele aplicații ale electronicii.

REZUMAT

● Atomul, cea mai mică particulă neutră de materie, este formată dintr-un nucleu central (cu sarcină pozitivă) și din electroni (sarcină negativă).

● Electronii gravitează în jurul nucleului avînd anumite energii proprii (niveluri) și, în anumite condiții, ei pot părăsi atomul (ionizare, excitare).

● Electronii liberi pot părăsi un metal sub forma emisiunii electronice datorită acțiunii următorilor factori:

— căldură (emisiune termoelectronică);
— lumină (emisiune fotoelectronică);
— bombardare cu electroni (emisiune secundară);
— cîmp electric (emisiune autoelectronică).

● Dioda cu vid este cel mai simplu tub electronic cuprinzînd catodul care emite electroni (emitor) datorită încălzirii și anodul care atrage și colectează electroni (colector) datorită tensiunii anodice.

● Trioda cu vid derivă din diodă prin introducerea grilei de comandă:

TRIODĂ = DIODĂ + GRILĂ

● La gazotron, curentul electric se datorește atît deplasării electronilor de la catod spre anod (ca la dioda cu vid), cît și deplasării ionilor de gaz de la anod spre catod.

● Conducția în semiconductoare se datorește deplasării electronilor negativi și a golurilor (pozitive).

● Prin impurificarea semiconductoarelor se obțin:
— semiconductoare tip n avînd nuclee donoare și electroni liberi;
— semiconductoare tip p — avînd nuclee acceptoare și goluri libere.

● Dioda semiconductoare — o joncțiune p-n.
Trioda semiconductoare (tranzistor) = două joncțiuni p-n-p (sau n-p-n).

● Circuitele electronice cuprind componente electronice: tuburi, elemente semiconductoare etc. precum și rezistoare, condensatoare etc. și sînt de tipuri diferite: redresoare, stabilizatoare, amplificatoare de impulsuri, oscilatoare etc.

VERIFICAREA CUNOȘTINȚELOR

1. Materialele se împart din punct de vedere electric în: conductoare, semiconductoare și izolatoare în funcție de:
   a — numărul de electroni din banda de valență?
   b — lățimea benzii interzise?
   c — numărul nivelurilor de energie în banda de conducție?

2. Emisiunea electronică reprezintă:
   a — deplasarea electronilor prin conductoare datorită încălzirii acestora?
   b — trecerea electronilor din banda de valență în cea de conducție?
   c — scoaterea electronilor din metale?

3. Conducția unidirecțională a diodei cu vid se datorește:
   a — emisiunii electronice a catodului?
   b — rezistenței interne mici a tubului?
   c — tensiunii anodice aplicate?

4. Rolul grilei în funcționarea triodei cu vid este:
   a — mărimea factorului de amplificare?
   b — frînarea (accelerarea) electronilor emiși de catod?
   c — mărimea pantei triodei respective?

5. Blocarea triodei cu vid este condiționată:
   a — numai de valoarea tensiunii de grilă?
   b — numai de valoarea tensiunii anodice?
   c — de valoarea tensiunii de grilă și a tensiunii anodice?

6. Efectul de amplificare al tranzistorului se datorește:
   a — creșterii rezistenței joncțiunii J_1?
   b — scăderii rezistenței joncțiunii J_2?
   c — creșterii tensiunii colector-emitor?

CAPITOLUL 11

APLICAȚII ALE ELECTRONICII

A. DOMENII DE APLICAȚIE

Domeniile de aplicație ale electronicii în tehnică sînt vaste și variate. Totuși, ținînd seamă de unele elemente comune, aplicațiile electronicii pot fi grupate în patru mari categorii: *telecomunicații, electronică energetică, automatică* și *cibernetică.*

● **Telecomunicațiile.** În această denumire generală este cuprinsă transmiterea de la distanță a diverselor tipuri de semnale conținînd anumite mesaje — sau informații — cum ar fi de exemplu un program de radio sau de televiziune, valoarea unei anumite mărimi (viteză, intensitatea razelor cosmice, temperatură) de pe o rachetă sau satelit etc.

● **Electronica energetică** se ocupă de instalațiile de putere relativ mare, care asigură transformarea energiei electrice de o anumită formă, în energie electrică de altă formă (de exemplu transformarea curentului alternativ în curent continuu, sau invers).

● **Automatica** este domeniul în care electronica și-a găsit un cîmp vast de aplicație; mai mult decît atît, dezvoltarea automaticii este practic de neconceput fără ajutorul electronicii. Din această cauză, cunoașterea elementelor și a circuitelor electronice este o condiție absolut necesară în studiul automaticii.

● **Cibernetica** este cel mai recent domeniu de aplicație a elementelor și circuitelor electronice.

Aplicațiile tehnice ale ciberneticii sînt calculatoarele electronice, utilizate în scopuri foarte diverse: în matematică — pentru rezolvarea unor ecuații, în tehnică — pentru conducerea automată a unui proces etc.

După cum s-a mai arătat, aplicațiile electronicii sînt atît de numeroase încît în cele ce urmează nu vor putea fi prezentate decît numai cîteva exemple din toate domeniile enunțate.

B. REDRESOARE

1. INTRODUCERE

O mare parte din instalațiile industriale moderne (circa 20%) folosesc energie electrică sub formă de curent continuu. Dintre consumatorii de curent continuu se pot menționa: electrochimia (de exemplu la prepararea aluminiului, cuprului, aurului etc.), tracțiunea electrică, sudura electrică, industria de celuloză, hîrtie, textile (pentru acționarea unor motoare) etc.

Deoarece pe scară industrială, în centralele electrice, curentul electric se produce sub formă de curent alternativ, cu frecvența de 50 Hz, sînt necesare instalații speciale care să transforme curentul alternativ în curent continuu. Acestea sînt — în principal — *redresoarele.*

Observație. Curentul obținut prin redresare nu este de fapt un curent cu adevărat continuu, ci un curent pulsatoriu, care conține o bună parte de curent continuu.

Redresarea poate fi *monoalternanță*, cînd alternanța (semiperioada) negativă este suprimată, sau *bialternanță*, cînd printr-un montaj special alternanța negativă este transformată tot în alternanță pozitivă.

Instalațiile de redresare se obțin aproape exclusiv cu ajutorul unora dintre elementele electronice descrise anterior, ca: diode cu vid, gazotroane, tuburi cu catod de mercur și diode semiconductoare (cu germaniu, cu siliciu, cu cuproxid, cu seleniu) sau diode comandate (tiristoare) etc.

Pentru puteri mici (pînă la 1 kW) se folosesc redresoare monofazate, iar pentru puteri mai mari — redresoare polifazate. Cînd se dorește ca valoarea curentului redresat să fie variabilă, se folosesc redresoare comandate.

2. REDRESOARE MONOFAZATE

a. Redresoare monoalternanță

În figura 11.1, *a* este arătat un exemplu de schemă de redresare cu diodă cu vid (*D*). Tensiunea de alimentare $U_0 = 120$ V este aplicată transformatorului T, care produce tensiunea $U = 200$ V (valoare eficace) pentru alimentarea circuitului anodic — în care este introdusă și rezistența de sarcină $R_s = 20$ kΩ — și tensiunea $U_f = 6{,}3$ V, necesară încălzirii filamentului diodei. Schema electrică echivalentă este dată în figura 11.1, *b*.

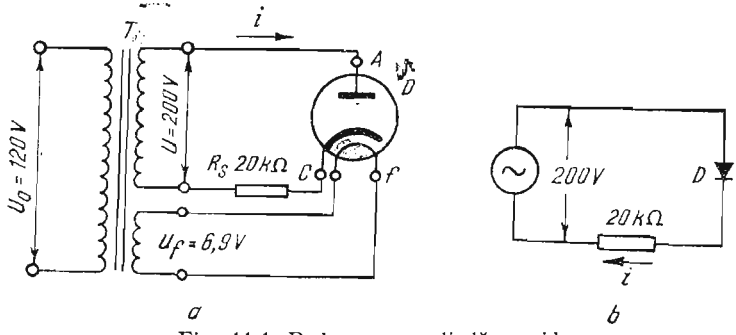


Fig. 11.1. Redresor cu o diodă cu vid:
a — schema completă; *b* — schema echivalentă.

Tensiunea alternativă sinusoidală u în înfășurarea secundară a transformatorului T (porțiunea care aparține circuitului anodic) va fi $u = U\sqrt{2}\sin \omega t = 200\sqrt{2}\sin \omega t$.

Dacă nu ar exista dioda, curentul alternativ corespunzător ar avea valoarea:

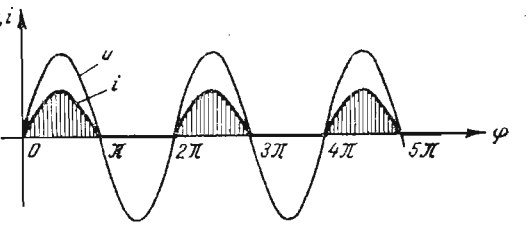


Fig. 11.2. Diagrama curentului la redresarea monoalternanță.

$$i = \frac{\sqrt{2}U}{R_s}\sin \omega t = \sqrt{2}\,\frac{200}{20\,000}\sin \omega t = \sqrt{2}\cdot 0{,}01 \cdot \sin \omega t$$

adică valoarea eficace I a curentului ar fi 0,01 A*:

$$I = 0{,}01 \text{ A} = 10 \text{ mA}.$$

În cazul redresării monoalternanță (fig. 1.12), alternanța negativă a curentului se anulează, deoarece la tensiune negativă tubul se blochează.

Curentul este pulsatoriu, având o variație în funcție de timp (unghiul $\varphi = \omega t$) ca cea arătată în figura 11.2. Curentul pulsatoriu conține o componentă continuă, numită *valoarea medie a curentului*, și o componentă alternativă.

Valoarea medie a curentului continuu redresat I_c se calculează cu relația:

$$I_c = \frac{1}{\pi}\sqrt{2}I = 0{,}45\ I.$$

Ținînd seama că între curent și tensiune există o proporționalitate directă, rezultă că între tensiunea redresată U_c de la bornele rezistenței de sarcină R_s și tensiunea alternativă aplicată (valoarea ei eficace), există o relație similară:

$$U_c = \frac{1}{\pi}\sqrt{2}U = 0{,}45\ U.$$

Factorul care multiplică tensiunea alternativă pentru a se obține tensiunea redresată (continuă) poartă numele de *factor de redresare f*.

În cazul de mai sus, factorul de redresare este:

$$f = \frac{1}{\pi}\sqrt{2} = 0{,}45,$$

curentul redresat este:

$$I_c = 0{,}45 \cdot 10 = 4{,}5 \text{ mA},$$

iar tensiunea redresată:

$$U_c = 0{,}45 \cdot 200 = 90 \text{ V}.$$

---

* Pentru intensitatea curentului alternativ există aceleași relații ca și pentru tensiune: $I_{max} = \sqrt{2}I$, în care I este intensitatea efectivă (eficace).

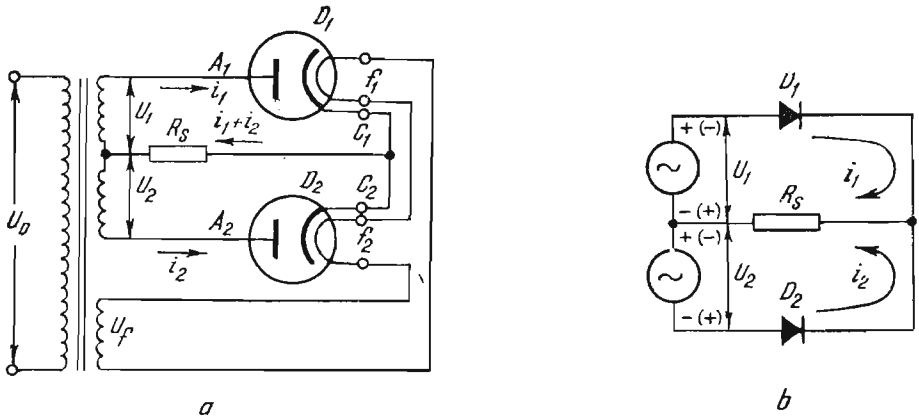


Fig. 11.3. Redresor cu două diode:
a — schema completă; *b* — schema echivalentă.

b. **Redresoare bialternanță**

Schema care realizează redresarea bialternanță necesită două diode, D_1 și D_2, și un transformator T, la care porțiunea de înfășurare secundară în care se produce tensiunea de alimentare a circuitului anodic are o priză mediană (la mijloc) (fig. 11.3, *a*). Filamentele pot fi încălzite în serie — ca în figura 11.3, *a* — sau în paralel. Schema echivalentă este dată în figura 11.3, *b*.

În cazul redresării bialternanță (fig. 11.4), dioda D_1 conduce în semiperioada pozitivă (curentul i_1), iar dioda D_2 conduce în semiperioada negativă (curentul i_2). Curentul total este dat de suma celor doi curenți, iar valoarea curentului continuu redresat I_c (valoarea medie) se calculează cu relația:

$$I_c = \frac{2}{\pi}\sqrt{2}I = 0{,}9\ I.$$

Observație. În cazul redresării bialternanță, factorul de redresare este dublu față de cazul redresării monoalternanță ($f = 0{,}9$).

De asemenea, tensiunea redresată U_c față de tensiunea alternativă aplicată U este dată relația:

$$U_c = \frac{2}{\pi}\sqrt{2}U = 0{,}9\ U.$$

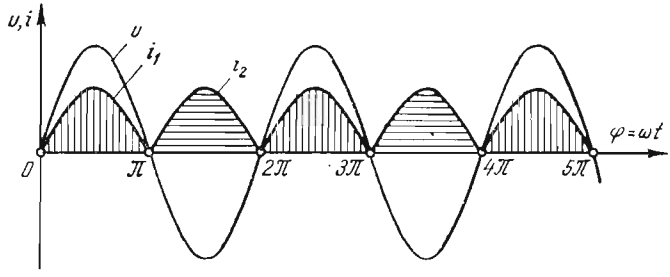


Fig. 11.4. Diagrama curentului la redresarea bialternanță.

Presupunînd că parametrii circuitului din figura 11.3 sînt aceiași ca în figura 11.1 ($R_s = 20\ k\Omega = 20\ 000\ \Omega$ și $U_1 = U_2 = 200$ V) rezultă că se va obține:

$$I_e = 0{,}9\ I = 0{,}9 \cdot 10 = 9\ mA$$

și

$$U_e = 0{,}9\ U = 0{,}9 \cdot 200 = 180\ V.$$

În cele ce urmează, schemele de redresare vor fi reprezentate numai prin schema echivalentă de calcul.

● **Redresor bialternanță în punte Graez.** O schemă de redresare bialternanță mult folosită este schema în punte Graez (fig. 11.5). În semiperioada pozitivă (cînd borna de sus a sursei este polarizată pozitiv față de borna de jos), circulația curentului i_1 este cea indicată cu linie plină, adică: plus — dioda D_2 — rezistența R_s — dioda D_3 — minus. În semiperioada negativă (plus jos și minus sus), circulația curentului i_2 este cea indicată cu linie întreruptă, adică plus — — D_4 — R_s — D_1 — minus.

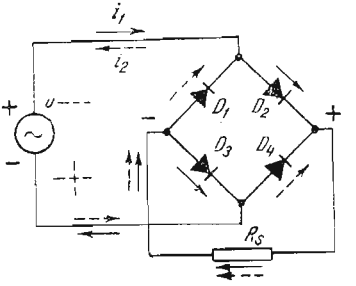


Fig. 11.5. Schema de redresare în punte Graez.

Variația în timp a curentului pulsatoriu (redresat) este aceeași ca în cazul precedent (fig. 11.4); valoarea medie a curentului redresat I_c și cea a tensiunii redresate sînt date de aceleași relații, adică:

$$I_c = 0{,}9\ I;$$

$$U_c = 0{,}9\ U.$$

De remarcat că schema în punte Graez necesită un număr mai mare de elemente redresoare.

3. REDRESOARE POLIFAZATE

Pentru puteri mai mari este necesară folosirea rețelei trifazate, iar cu ajutorul unor transformatoare speciale de adaptare se realizează *redresoare trifazate* ($m = 3$ alternanțe într-o perioadă), *redresoare hexafazate* ($m = 6$), *redresoare dodecafazate* ($m = 12$) etc.

În figura 11.6 este prezentată schema unui redresor trifazat în punte, adică asigurînd redresarea ambelor alternanțe. În acest caz se obțin șase alternanțe într-o perioadă ($m = 6$) diagrama curentului redresat fiind prezentată în figura 11.7.

La o asemenea schemă factorul de redresare este $f = 1{,}35$, respectiv se va obține $I_B = 1{,}35\ I$ și $U_C = 1{,}35\ U$.

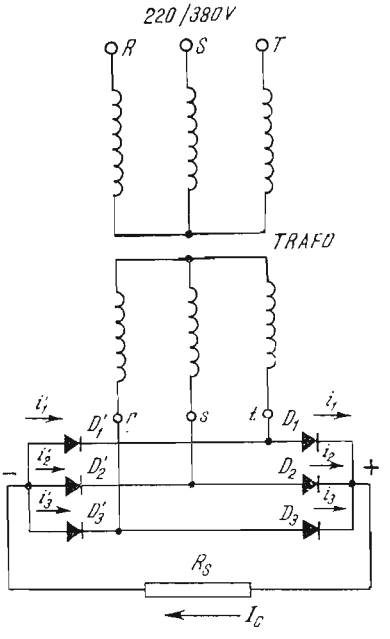


Fig. 11.6. Schema de redresare trifazată în puncte.

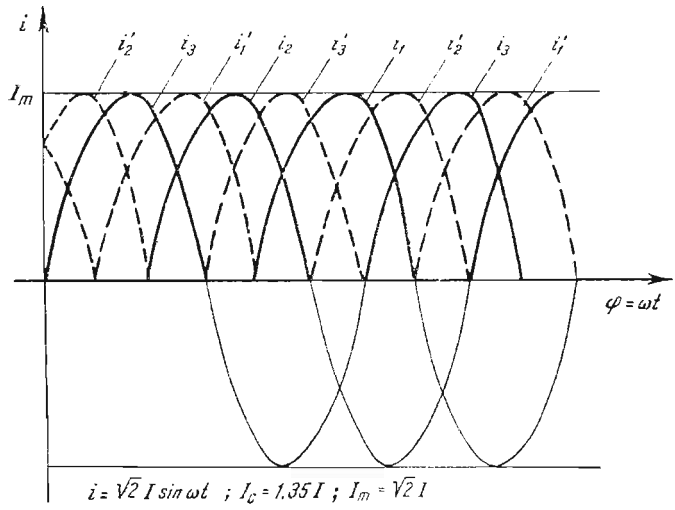


Fig. 11.7. Diagrama curentului de redresare trifazată în punte.

C. RADIOFONIA

Postul de radioemisie cuprinde un circuit oscilant LC (oscilator) în care se produc oscilații electrice de înaltă frecvență ce sînt trimise într-o antenă care le radiază în spațiu sub formă de unde (radiații) electromagnetice. Peste acești curenți de înaltă frecvență sînt suprapuși (modulați) curenții de frecvență acustică (audiofrecvență), cuprinși aproximativ în banda de 16—20 000 Hz. În figura 11.8 este arătată schema simplificată, de principiu, a unui post de radioemisie. Modul de funcționare a postului este următorul:

La conectarea sursei de tensiune anodică U_A, în circuitul oscilant LC apar curenți de înaltă frecvență datorită fenomenului de rezonanță electrică a circuitului respectiv. Valoarea frecvenței de oscilație este $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$, rezultată din condiția egalității reactanței inductive cu reactanța capacitivă $\left(L\omega = \frac{1}{C\omega}\right)$, care caracterizează fenomenul de rezonanță (v. cap. IV). Oscilațiile nu se sting (oscilații întreținute) — deși existența unor pierderi este inerentă — datorită faptului că bobina L induce în bobina L_G (cu care este cuplată inductiv) o tensiune de aceeași frecvență f_0, care se aplică pe grila tubului E și este amplificată de tub. Deoarece circuitul LC se află înseriat în circuitul anodic al tubului E, efectul va fi menținerea la o valoare (amplitudine) constantă a curentului de frecvență

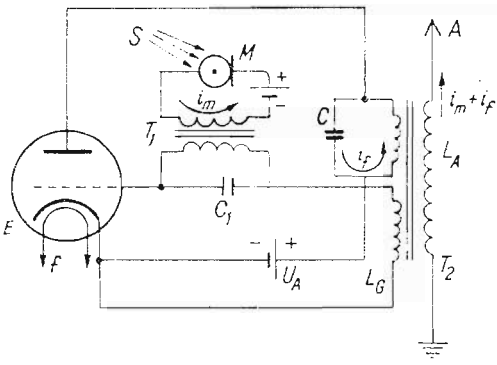


Fig. 11.8. Schema principială a unui radioemițător.

f_0 din circuit. Acest curent este indus și în bobina L_A și emis de antena A sub formă de unde electromagnetice. Variația în timp a acestor oscilații de înaltă frecvență (curenții) este dată în figura 11.9, *a*. Dacă în microfonul M ajung sunetele (vorbire sau muzică) de la o sursă de sunet S, în circuitul acestuia apare curent i_m de frecvență acustică, avînd amplitudinea variabilă în funcție de intensitatea (tăria) sunetului și frecvența variabilă în funcție de înălțimea sunetului (mai subțire sau mai grav) (fig. 11.9, *b*). Cei doi curenți — cel purtător i_f și cel sonor i_m — se suprapun; i_f este modulat, astfel încît oscilațiile care sînt induse în antenă au forma din figura figura 11.9, *c*. Undele electromagnetice emise în aceste condiții de postul de radio emisie sînt unde purtătoare modulate cu semnale de frecvență acustică.

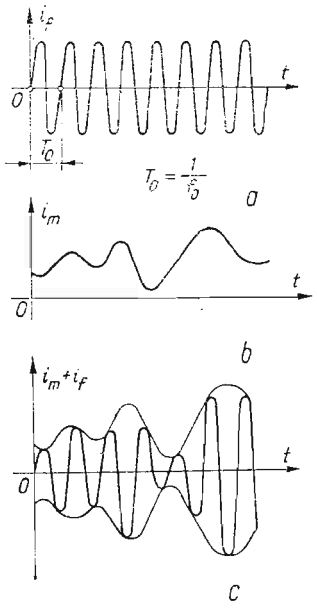


Fig. 11.9. Modulația curenților radio:

a — curentul de înaltă frecvență (purtător); *b* — curentul de joasă frecvență (modulator); *c* — curentul emis (modulat.

Pentru fiecare post emițător se repartizează prin convenții internaționale anumite frecvențe purtătoare. Uneori frecvența de emisie f_0 este indicată prin lungimea de undă λ_0 a postului respectiv, care se exprimă prin relația:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} \text{ [m]},$$

unde c este viteza de propagare a undelor electromagnetice (viteza luminii), egală cu 300 000 000 m/s.

În funcție de valoarea acestor lungimi de undă s-au stabilit benzile de unde: *lungi*, *medii*, *scurte* și *ultrascurte*.

Postul de radiorecepție (fig. 11.10) cuprinde de asemenea o antenă de recepție A, care, deși primește simultan (captează) unde electromagnetice de la mai multe posturi de emisie, separă prin fenomenul de rezonanță numai curentul i_0 de frecvență f_0, corespunzător frecvenței de rezonanță a circuitului LC:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Cu ajutorul diodei D (de fapt un redresor), curentul recepționat este demodulat, adică i se oprește curentul purtător (fenomenul poartă numele de *detecție*); curentul de frecvență acustică trece mai departe și este aplicat difuzorului F care reproduce sunetele emise.

Condensatorul C este un condensator variabil. Capacitatea sa poate

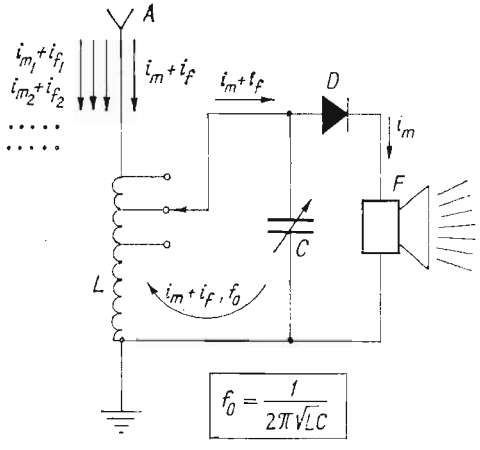


Fig. 11.10. Schema principială a unui radioreceptor.

fi modificată cu ajutorul unui buton de acord. Astfel poate fi modificată frecvența f_0 și deci poate fi recepționat alt post de emisie. Inductanța L poate fi de asemenea variată în trepte. În acest mod se schimbă o bandă de frecvență cu alta, deci o gamă de lungimi de undă cu alta.

Notă. Aparatul descris mai sus reprezintă tipul de aparat cu galenă și căști (numele de galenă este dat sulfurii de plumb — semiconductorul din care este format detectorul D). În prezent, aparatele mari de radiorecepție sînt construite după principiul numit „superheterodină", în care unda modulată recepționată este întîi prelucrată într-un etaj de amestec, cu ajutorul unei oscilații produse în însuși aparatul de recepție (în etajul oscilator), apoi amplificată, detectată și din nou amplificată.

Sistemul de modulație prezentat în figura 11.9 se numește *modulație în amplitudine* deoarece curentul modulat (fig. 11.9, *c*) are amplitudinea variabilă în funcție de amplitudinea curentului de audiofrecvență. În sistemele de transmisiune mai recente, de pildă în gama de unde folosite pentru televizoare (banda de UKW), se folosește *modulația în frecvență*. În acest caz, curentul modulat are amplitudine constantă însă frecvența este variabilă în funcție de frecvența curentului de audiofrecvență.

D. OSCILOSCOPUL CATODIC

În tehnică, pentru reglarea și verificarea unor instalații electrice sau electronice un aparat de mare importanță este *osciloscopul catodic*. Osciloscopul catodic este un aparat de laborator care permite reproducerea pe un ecran a mărimilor electrice — curenți sau tensiuni — variabile în timp. El și-a găsit o largă aplicare în cele mai felurite domenii tehnice.

Elementul principal al osciloscopului catodic este tubul catodic, care sub diverse forme constructive este folosit și în televiziune, radiolocație etc.

Ca și un tub electronic obișnuit, tubul catodic (fig. 11.11) cuprinde un catod C, încălzit de filamentul f, și un anod A care, avînd un orificiu central permite trecerea mai departe a unui fascicul r din electronii emiși de catod. Fasciculul atinge ecranul E. Ecranul fiind acoperit cu o substanță fluorescentă, în locul atins de raza (fascicul) electronică r se produce un punct luminos (spot). Diafragma D face ca raza electronică să fie cît mai concentrată, adică punctul de pe ecran să fie cît mai mic și mai luminos. Elementele amintite pînă aici constituie un tun electronic.

Raza electronică trece în drumul ei printre plăcile de deflexie P_1 și P_2 (de fapt niște condensatoare plan-paralele) care, alimentatate cu o tensiune variabilă, deplasează raza r pe verticală (plăcile P_1) și pe orizontală (plăcile P_2). Dacă tensiunile aplicate plăcilor P_1 și P_2 sînt nule, punctul luminos cade în centrul ecranului; dacă se aplică tensiunile plăcilor P_1, punctul luminos se deplasează pe verticală în sus sau jos, în funcție de semnul tensiunii aplicate și la o distanță ce crește proporțional cu valoarea tensiunii. Similar, are loc deplasarea pe orizontală cu ajutorul plăcilor P_2.

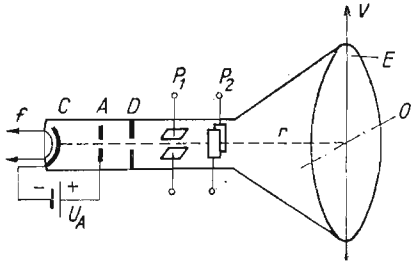


Fig. 11.11. Schema tubului catodic.

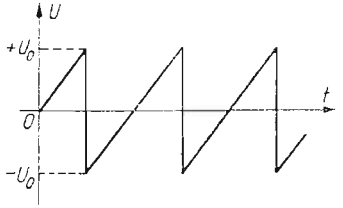


Fig. 11.12. Diagrama tensiunii în dinți de ferăstrău.

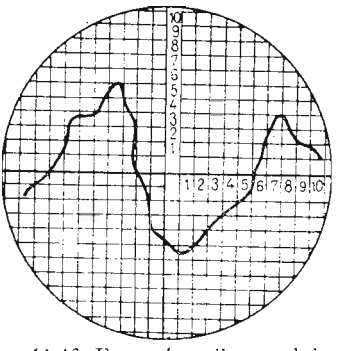


Fig. 11.13. Ecranul osciloscopului catodic.

În cazul folosirii tubului la osciloscopul catodic, pe plăcile P_1 se aplică tensiunea alternativă de studiat, iar pe plăcile P_2 — o tensiune numită „a bazei de timp", care este o tensiune alternativă, periodică, în dinți de ferăstrău (fig. 11.12).

Datorită faptului că această tensiune variază continuu și liniar de la valoarea $-U_0$ la $+U_0$, și apoi brusc de la $+U_0$ la $-U_0$, punctul luminos se va deplasa pe ecran cu viteză constantă de la stînga la dreapta ecranului, iar apoi brusc va reveni la stînga ecranului, perioada fiind reluată. Dacă frecvența tensiunii bază de timp este suficient de mare, imaginea punctului luminos va fi o linie orizontală (răstimpul foarte scurt de întoarcere a spotului, nu mai poate fi sesizat).

Prin aplicarea și pe plăcile P_1 a unei tensiuni oarecare a cărei variație în timp trebuie studiată, mișcarea punctului luminos se va face simultan în două direcții, adică pe orizontală cu viteza constantă datorită tensiunii plăcilor P_2 (baza de timp) și pe verticală datorită tensiunii plăcilor P_1 (tensiunea de studiat). În acest fel, tensiunea de studiat va apărea pe ecran chiar sub forma de reprezentare grafică a variației ei în timp (fig. 11.13). Ecranul este caroiat și gradat pe verticală și orizontală, astfel încît se pot aprecia și cantitativ parametrii tensiunii de studiat (amplitudinea, perioada etc.).

Notă. Osciloscopul catodic care permite și fotografierea curbelor respective poartă numele de *oscilograf catodic*.

E. TELEVIZIUNE

Emițătorul de televiziune are ca element principal o cameră de luat vederi. Aceasta cuprinde un tub catodic special, numit *tub videocaptor*. Față de tubul anodic descris mai sus, tubul videocaptor (fig. 11.14) mai posedă un mare număr de celule F, realizate din argint, situate paralel cu ecranul E și separate de acesta prin dielectricul M, format dintr-o foaie de mică. Imaginea obiectului O este reprodusă prin obiectivul de lentile L, pe ecranul E. Perechea ecran E — celulă F constituie de fapt o mică celulă fotovoltaică (fotoelectrică) care produce sarcini electrice proporționale cu intensitatea razei ce cade în punctul respectiv.

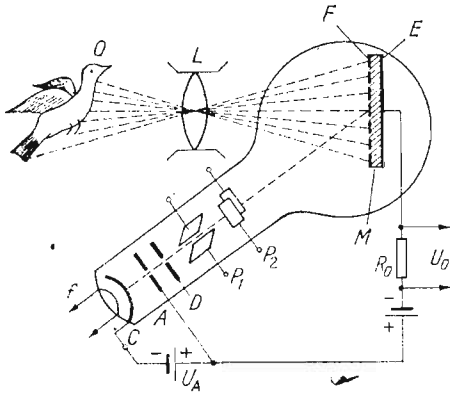


Fig. 11.14 Tubul videocaptor.

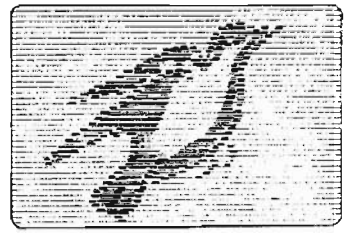


Fig. 11.15. Imaginea pe ecranul televizorului.

Prin aplicarea unor tensiuni convenabile pe plăcile P_1 și P_2 raza r a tubului electronic mătură (baleiază) succesiv (de la stînga la dreapta și de sus în jos) toate celulele F, descărcînd de asemenea succesiv prin circuitul rezistenței R_0 sarcinile fiecărei celule (raza r în continuă mișcare are rolul unui comutator care închide succesiv circuitul prin fiecare celulă fotovoltaică). Deoarece aceste sarcini electrice sînt proporționale cu intensitatea luminoasă a fiecărui punct al obiectului, rezultă că și tensiunea U_0 la bornele rezistenței R_0 va fi variabilă în timp.

Emisiunea de televiziune se concretizează deci prin transmiterea unei serii de impulsuri (de amplitudine cu atît mai mare cu cît luminozitatea punctelor corespunzătoare ale imaginii crește de la negru-gri spre alb) obținute prin explorarea succesivă prin puncte a imaginii, de la stînga spre dreapta și pe linii de sus în jos.

De exemplu, posturile de emisie ale Televiziunii Române realizează explorarea imaginilor care trebuie televizate, după un număr de 625 de linii orizontale, transmițînd 25 de imagini pe secundă.

Receptorul de televiziune cuprinde de asemenea un tub catodic, numit *tub cinescop*, la care intensitatea razei electronice r este proporțională cu tensiunea emisă U_0. Mișcarea razei r este riguros aceeași ca și la tubul videocaptor, adică baleiajul ecranului la emisie este sincronizat cu cel de la recepție. Ca rezultat pe ecranul tubului cinescop, care este fluorescent, va apărea prin puncte de intensitate luminoasă variabilă imaginea obiectului transmis (fig. 11.15).

Se observă că, în cazul lipsei emisiunii, baleiajul receptorului se realizează cu o rază de intensitate constantă, ceea ce face ca pe ecran să apară numai niște linii orizontale luminoase (rastrul).

În cazul emisiunii la care baleiajul receptorului nu este sincronizat, numărul de ordine al liniei de explorare de la emisie nu coincide cu cel al liniei de pe ecranul televizorului, ceea ce are ca efect impresia că imaginea se deplasează în sus, respectiv în josul ecranului.

Paralel cu emisiunea de imagine se transmite și emisiunea de sunet (radiofonie).

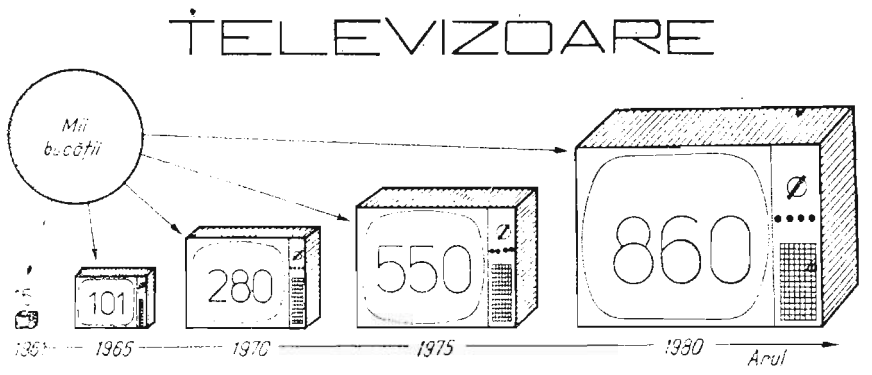


Fig. 11.16. Diagrama creșterii numărului de televizoare în R.S. România.

Părțile de emisie și recepție, precum și canalele de transmisie pentru imagine și sunet sînt independente; de aceea poate apărea uneori imaginea fără sunet sau invers.

În general o emisiune de televiziune poate fi recepționată pînă la o distanță de 100—150 km datorită proprietății undelor ultrascurte de a se propaga în linie dreaptă. Cu ajutorul unor instalații de retransmisie pot fi acoperite însă distanțe mult mai mari. Astfel, releele de pe Coștila, Feleac, Topolog etc., fac ca emisiunile de televiziune din țara noastră să fie practic recepționate pe întreg teritoriul țării.

Întreprinderea Electronica din Capitală fabrică o gamă mare de receptoare de televiziune, cu performanțe superioare.

Ca și în cazul aparatelor de radiorecepție numărul de televizoare produse în țara noastră cunoaște o creștere foarte rapidă, fapt care este ilustrat de diagrama din figura 11.16.

F. VOLTMETRUL ELECTRONIC

Voltmetrele obișnuite descrise anterior (v. cap. 8) au în general rezistențe proprii ce nu depășesc 20 kΩ/V. Aceasta înseamnă, de exemplu, că rezistența internă a unui astfel de voltmetru, cu o scară de măsurare de 30 V are o rezistență internă:

$$R_V = 30 \text{ V} \cdot 20 \text{ k}\Omega/\text{V} = 600 \text{ k}\Omega.$$

Folosind un asemenea voltmetru pentru măsurarea unor căderi de tensiune pe rezistențele de valori avînd același ordin de mărime cu R_V (de exemplu în circuitele electronice se întîlnesc rezistențe 200—2 000 kΩ) măsurările vor fi complet eronate întrucît consumul relativ al voltmetrului este foarte mare. De exemplu dacă avem de măsurat căderea de tensiune de pe rezistența $R_2 = 600$ kΩ (fig. 11.17, *a*) în serie cu $R_1 = 600$ kΩ și alimentate de la sursa de tensiune $E = 36$ V, se constată că aceasta este în realitate $U_2 = 18$ V, dar cînd se leagă voltmetrul (fig. 11.17, *b*) ea scade la valoarea $U_2 = 12$ V. Este evident că, o asemenea eroare de măsurare de 6 V ($\varepsilon = 33\%$) este inadmisibilă. În plus, dacă divizorul R_1, R_2 este folosit într-o schemă electronică

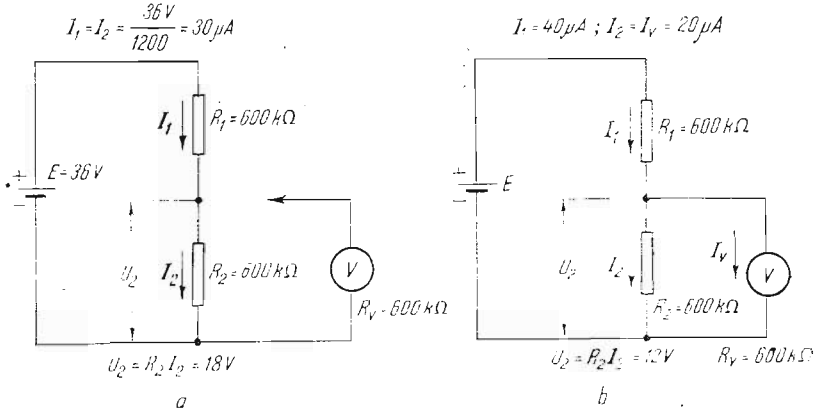


Fig. 11.17. Căderea de tensiune pe o rezistență:
a — fără voltmetru legat; *b* — cu voltmetru legat.

cu tranzistoare, măsurarea cu ajutorul voltmetrului prezentat poate produce perturbații grave în montajul electronic respectiv. De exemplu, curentul I_V maximum de 50 μA absorbit de voltmetru * este de cîteva zeci de ori mai mare decît curentul din bază, necesar deschiderii unui tranzistor de putere mică.

În sfîrșit, situația este și mai gravă în cazul utilizării unor astfel de voltmetre pentru măsurarea la frecvențele înalte folosite în electronică datorită în special reactanțelor capacitive $X_c = \frac{1}{2\pi fC}$ ale înfășurărilor voltmetrului care scad proporțional cu creșterea frecvenței. Aceste inconveniente sînt eliminate prin realizarea unor voltmetre cu impedanță de intrare foarte mare (2—10 MΩ). Soluția constructivă constă în folosirea unui instrument de măsurare obișnuit — un miliampermetru magnetoelectric cu clasă de precizie bună, și sensibilitate mare, conectat printr-un montaj de componente electronice, ansamblu ce poartă denumirea de *voltmetru electronic*.

● **Voltmetre electronice de curent continuu.** Cea mai simplă schemă de voltmetru electronic pentru curent continuu este prezentată în figura 11.18, *a*. Comutatorul K fiind pe poziția *2* se stabilește punctul de funcționare *i* (fig. 11.18, *b*) al triodei T printr-o negativare inițială αE_g a grilei tubului. În acest mod, cînd tensiunea de intrare este nulă ($U_0 = 0$) tubul nu este complet blocat pentru a se evita porțiunea neliniară *b—i* (v. fig. 10.10).

În circuitul anodic al tubului T se introduce miliampermetrul magnetoelectric *mA* alimentat prin sursa de tensiune E_A. Întrucît în lipsa semnalului de intrare ($U_i = 0$) curentul anodic are o valoare I_{A0} (fig. 11.18, *b*) se prevede un circuit de compensare format din sursa de tensiune E_C și reostatul R_C, astfel ca în starea inițială indicația miliampermetrului să fie nulă $I_{C0} = \frac{E_C}{R_C} = -I_{A0}$. Măsurarea unei tensiuni oarecare U_i se efectuează cu comutatorul K pe poziția *1*, valoarea tensiunii de măsurare fiind amplificată de

* $I_V = \frac{30\ V}{600\ k\Omega} = 0{,}00005\ A = 50\ \mu A.$

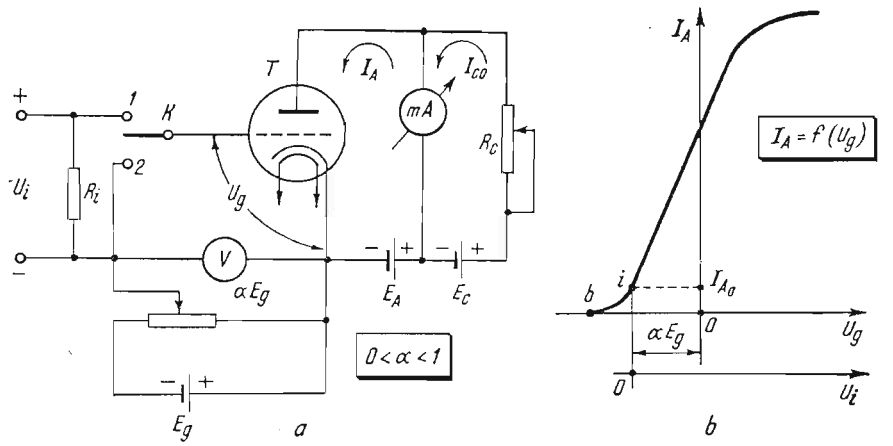


Fig. 11.18. Voltmetru electronic de curent continuu:
a — schema electrică; *b* — caracteristica de funcționare.

către tubul T și materializată prin curentul anodic I_A care străbate miliampermetrul mA. Cu o etalonare corespunzătoare a miliampermetrului și folosind un comutator K cu mai multe poziții (diverse valori pentru rezistența R_i) se poate citi direct tensiunea aplicată corespunzător la diverse domenii de măsurare (de exemplu 0—300 mV ... 0—300 V etc.).

În locul triodei T se poate folosi bineînțeles ca amplificator un tranzistor în montajul cu emitor comun (v. fig. 10.18, *a*). Montajul descris prezintă avantajul unei impedanțe de intrare mare, însă are și următoarele dezavantaje:

— necesitatea verificării poziției de zero înaintea fiecărei măsurări;

— neliniaritatea scării miliampermetrului datorită neliniarității pantei tubului (v. explicația la fig. 10.10);

— apariția unor erori de măsurare datorită variației în timp și cu temperatura a pantei tubului.

În mod practic se folosesc voltmetre electronice în punte avînd schemele din figura 11.19, *a* și *b*, și care elimină dezavantajele semnalate. Astfel, în lipsa mărimii de măsurat U_i (fig. 11.19, *a*) rezistențele R_1, R_2 și R_3, împreună cu rezistența R_T a tranzistorului formează o punte Wheatstone la echilibru. Prin varierea mărimii de măsurat U_i, rezistența R_T se modifică și ca urmare puntea se dezechilibrează variind curentul I_A din diagonala punții. Întrucît curentul I_A depinde și de valoarea tensiunii de alimentare E_A, este necesar să se folosească o sursă de tensiune stabilizată. Dacă în locul rezistorului R_2 se introduce un tranzistor T_2 identic cu T_1 se obține montajul simetric din figura 11.19, *b*, care este insensibil la variațiile tensiunii de alimentare E_A.

Deoarece tranzistoarele T_1 și T_2 se aleg identice și funcționează în condiții identice, parametrii lor se modifică în același mod cu timpul (și cu temperatura), astfel încît voltmetrul funcționează corect și după îmbătrînirea sau încălzirea tranzistoarelor.

● **Voltmetre electronice de curent alternativ.** Acestea sînt de fapt tot voltmetre de curent continuu prevăzute cu un circuit de redresare și filtrare prealabilă a tensiunii de intrare.

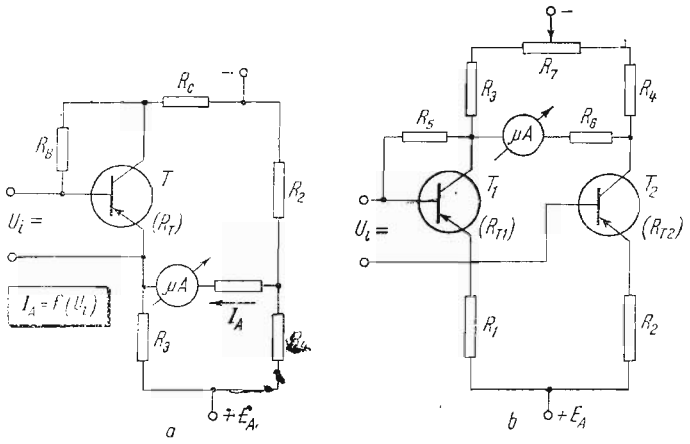


Fig. 11.19. Scheme ale voltmetrului electronic în punte dezechilibrată:
a — cu un braț activ; *b* — cu două brațe active.

În figura 11.20 este reprezentată schema completă a unui voltmetru electronic simplu care poate fi folosit și în curent continuu și în curent alternativ. Se observă că este folosit un montaj electronic în punte avînd cele două tranzistoare cu brațe active alăturate ale punții. Cele două tranzistoare sînt permanent într-o stare de conducție datorită existenței rezistențelor de prepolarizare a bazelor (39 kΩ). Tensiunea de intrare aplicată între cele două baze ale tranzistoarelor face ca, în funcție de polaritatea sa, față de starea de echilibru anterioară un tranzistor să se deschidă mai mult, iar celălalt să se închidă. În acest fel puntea se dezechilibrează proporțional cu tensiunea aplicată, producînd curentul de dezechilibru care străbate microampermetrul μA

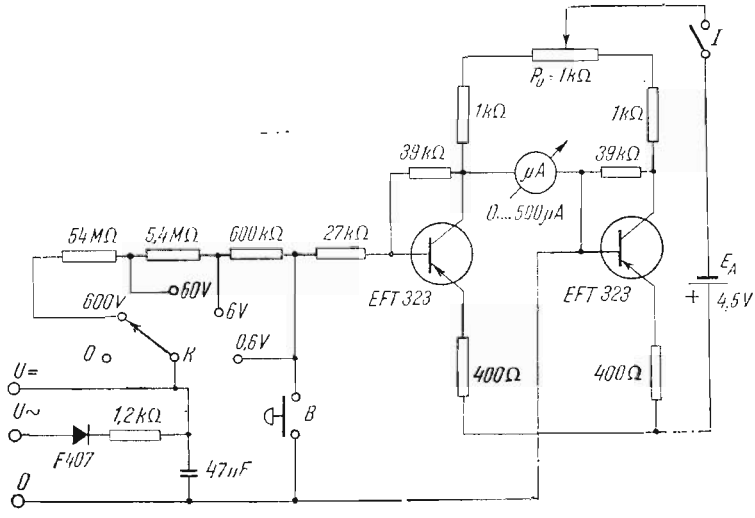


Fig. 11.20. Voltmetru electronic tranzistorizat pentru curent alternativ și curent continuu.

Măsurarea se efectuează în modul următor:

● **În curent continuu.**

Se aplică tensiunea de măsurat între bornele U și O, comutatorul K fiind plasat pe poziția O.

Se închide întreruptorul I, montajul primind tensiunea auxiliară E_A și, apăsînd butonul B se manevrează potențiometrul P_0 pînă ce puntea se echilibrează, microampermetrul indicînd deci curentul zero.

Eliberînd butonul B se manevrează comutatorul K pe poziția necesară a domeniului de măsurare scoțînd succesiv rezistențele adiționale.

Tensiunea măsurată este indicată de microampermetrul μA care are scara etalonată direct în volți.

● **În curent alternativ.**

Se aplică tensiunea de măsurat între bornele $U \sim$ și O, ceea ce asigură procesul de detecție, curentul aplicat fiind deci redresat și filtrat. În rest se procedează ca și în cazul curentului continuu.

Așa cum a fost proiectat voltmetrul electronic prezentat poate măsura tensiuni de pînă la 600 V c.c. și curent alternativ de maximum 100 kHz, rezistența sa specifică de intrare fiind de 100 kΩ/V.

REZUMAT

Aplicațiile electronicii în tehnică pot fi grupate în următoarele domenii:

● Telecomunicații — exemplu: radiofonie, televiziune, telefonie, în general teletransmisiile informațiilor.

● Electronica energetică — exemplu: redresoare, cuptoare de înaltă frecvență.

● Electronica energetică — exemplu: redresoare, cuptoare de înaltă frecvență, generatoare ultrasonice etc.

● Automatică — exemplu: sisteme de măsurare, protecție, comandă, reglare etc.

● Cibernetică: calculatoare electronice.

VERIFICAREA CUNOȘTINȚELOR

1. Factorul de redresare este o mărme care:
   a — crește cu numărul fazelor?
   b — scade cu numărul fazelor?
   c — este independentă de numărul de faze?
2. La redresarea bialternanță cu punte Graez, curentul continuu obținut este în raport cu valoarea eficace a curentului alternativ:
   a — mai mic?
   b — mai mare?
   c — egal?
3. Prin modulare — demodulare se asigură:
   a — amplificarea în amplitudine a semnalelor de frecvență joasă?
   b — amplificarea în frecvență a semnalelor de frecvență joasă?
   c — transmiterea la distanță a frecvențelor joase?
4. Forma unei tensiuni continue de valoare constantă se prezintă pe ecranul unui osciloscop sub forma:
   a — unei drepte orizontale?
   b — une drepte verticale?
   c — unor dnți de ferăstrău?

CAPITOLUL 12

AUTOMATICA

A. INTRODUCERE ÎN AUTOMATICĂ

1. OBIECTUL AUTOMATICII

În procesul de producere a bunurilor materiale, o importanță covîrșitoare o are automatizarea acestui proces, adică realizarea bunurilor fără participarea directă a omului.

O instalație care realizează un anumit proces de producție este caracterizată de o serie de mărimi fizice variabile, numite *parametri*. De exemplu, la o centrală termoelectrică se întîlnesc o serie de parametri cum ar fi temperatura, presiunea și debitul aburului produs în cazan, tensiunea electrică, curentul electric, frecvența, puterea etc., produse de generatoarele electrice etc.

Între acești parametri există anumite legături de interdependență, consecință a unor legi fizice. Ca urmare, la variația unora dintre parametri se modifică și alți parametri ai instalației. Dacă, de exemplu, debitul de abur absorbit de turbină scade, iar debitul de combustibil ars în cazan rămîne neschimbat, va rezulta o scădere a presiunii și a temperaturii aburului.

Se constată din acest exemplu că în funcționarea unei instalații tehnologice, satisfacerea unei anumite necesități a producției (aici, producerea unui debit de abur) poate influența negativ asupra calității produsului (aburului). Din această cauză, într-o instalație neautomatizată există un personal de exploatare care măsoară sau controlează valoarea parametrilor instalației (în exemplul dat — măsoară presiunea, temperatura și debitul aburului), și comandă — dacă este cazul — modificarea acestora prin intervenția la anumite elemente din instalație (în exemplul dat, modifică presiunea și temperatura aburului prin comanda de deschidere sau închidere a unor vane sau ventile de admisie a combustibilului sau a apei de alimentare). Dacă prin diverse modificări se obține ca anumiți parametri să fie menținuți la valori prescrise se spune că parametrii respectivi se reglează.

Prin introducerea automatizării, funcțiunile de *măsurare, control, comandă* și *reglare* au fost scoase de sub acțiunea directă a omului și trecute în seama unor dispozitive de automatizare sau automate, care sînt studiate în cadrul automaticii.

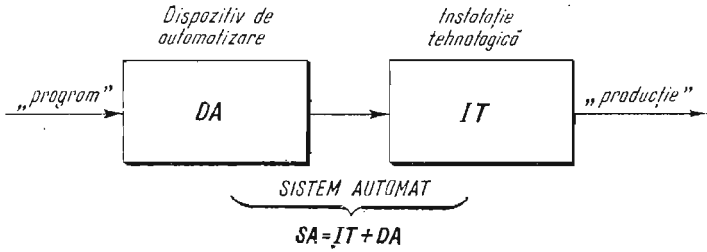


Fig. 12.1. Schema structurală a unui sistem automat.

Aplicarea de dispozitive de automatizare unei instalații sau unui proces tehnologic se numește *automatizarea* procesului respectiv.

Ansamblul format din dispozitivul de automatizare (*DA*) și din instalația tehnologică (*IT*) constituie un *sistem automat* (*SA*) (fig. 12.1).

Operațiile de automatizare și, corespunzător, dispozitivele de automatizare, sînt foarte diverse; totuși, pe baza unor trăsături și funcțiuni comune dispozitivele de automatizare (și deci sistemele automate) se clasifică în: dispozitive (sisteme) de *măsurare*, de *control*, de *comandă*, de *semnalizare*, de *protecție*, de *reglare* etc. Sistemele automate respective vor fi definite, analizate și exemplificate în paragrafele ce urmează.

2. NECESITATEA ȘI AVANTAJELE AUTOMATIZĂRII PRODUCȚIEI

Diversele procese tehnologice se desfășoară cu anumite viteze mai mari sau mai mici, în funcție de specificul fiecăruia. Astfel, de exemplu, procesul de încălzire a apei dintr-un cazan se desfășoară cu o viteză relativ redusă, din care cauză el se mai numește și proces *lent*. Producerea energiei electrice într-un generator este însă un proces *rapid*, deoarece viteza de variație a parametrilor (puterea debitată, frecvența, tensiunea la borne etc.) este mult mai mare.

Pentru un om (operator uman), a cărui capacitate de supraveghere, viteză de gîndire și de reacție sînt limitate, conducerea unui proces devine din ce în ce mai dificilă, pe măsură ce procesul este mai rapid. Aceasta este una din cauzele care pledează pentru necesitatea introducerii automatizării în producție. Mai mult decît atît, unele procese — pe care le vom numi *ultrarapide* — ca de exemplu reacțiile într-un reactor atomic sau zborul unei rachete cosmice — conțin atît de mulți parametri, care variază atît de repede, încît dirijarea procesului respectiv este practic imposibilă fără introducerea automatizării.

Introducerea pe scară largă a automatizărilor în toate domeniile vieții economice deschide perspective mari în ceea ce privește aspectul calitativ al producției.

Necesitatea obiectivă a automatizării proceselor de producție se datorește avantajelor substanțiale pe care aceasta le oferă:

— eliberarea omului de la conducerea nemijlocită a proceselor și instalațiilor tehnologice de producție, activitate umană foarte obositoare;

— creșterea vitezei de lucru a mașinilor și a utilajelor și implicit creșterea apreciabilă a producției și a productivității muncii; lucrul decurge ritmic și fără timpi morți;

— folosirea intensivă a agregatelor, mașinilor și utilajelor, prin ridicarea indicilor de utilizare ai acestora (de exemplu funcționarea neîntreruptă, ziua și noaptea);

— realizarea proceselor de producție în condițiile creșterii substanțiale a calității produselor;

— reducerea considerabilă a cheltuielilor de producție, prin reducerea consumurilor specifice de materie primă și materiale.

Observație. Eliberarea omului de munca obositoare a conducerii directe a proceselor de producție se îmbină cu necesitatea perfecționării tehnice a cadrelor, în scopul realizării unor noi funcțiuni, cu o participare mai largă a muncii intelectuale.

3. PROCES MANUAL-MECANIZARE-AUTOMATIZARE-TELEMECANIZARE-CIBERNETIZARE

● **Proces manual.** Procesele de producție suferă o transformare continuă pe măsura dezvoltării societății, deci și a dezvoltării științei și tehnicii. Această transformare constă în reducerea treptată a muncii fizice a omului, compensată de o creștere corespunzătoare a muncii intelectuale, care se asigură prin creșterea calificării profesionale. Un asemenea proces evolutiv este normal și el se datorește ridicării la un nivel din ce în ce mai înalt al gîndirii umane. Înainte de descoperirea și utilizarea forței motoarelor — a mașinilor cu abur, a motoarelor electrice sau a celor cu ardere internă — majoritatea proceselor de producție se efectuau manual. Se cunoaște, în adevăr, încă din antichitate, forța vîntului și a căderilor de apă, care au contribuit la realizarea primelor agregate — motoare eoliene sau hidraulice — însă gradul de participare a muncii fizice a omului în procesul de producție era încă foarte mare.

● **Mecanizare.** În prezent, instalațiile tehnologice de producție folosesc ca surse de energie mecanică diverse tipuri de motoare, în special motoare electrice. Această fază de dezvoltare a proceselor de producție poartă numele de mecanizare.

● **Automatizare.** Prin introducerea automatizării, omul nu mai participă direct la procesul de producție; el nu mai trebuie deci să comande închiderea sau deschiderea unor vane, pornirea sau oprirea unor agregate etc., sarcina respectivă trecînd în seama dispozitivelor de automatizare.

Observație. Pentru a putea automatiza un proces tehnologic, el trebuie mai întîi complet mecanizat. Astfel, de exemplu, toate vanele trebuie prevăzute cu motoare de acționare, toate întreruptoarele — cu dispozitive de comandă etc.

● **Telemecanizare.** Uneori o serie de instalații tehnologice repartizate pe o suprafață relativ mare pot lucra într-o legătură funcțională de interdependență, constituind o instalație complexă. De exemplu, sistemul energetic-național este o instalație complexă cuprinzînd toate centralele termo- și hidroelectrice, liniile de transport, stațiile de transformare și consumatorii de energie electrică de pe întreg teritoriul țării. Pentru a se realiza o conducere centralizată, care să asigure funcționarea în bune condiții a instalației complexe în ansamblu, este necesar ca toate informațiile privind desfășurarea procesului, precum și deciziile de conducere, să fie primite și respectiv date de către un organ central, numit *dispecer*, în exemplul dat — *dispecerul energetic național*. Din punctul de dispecer se poate acționa la distanță asu-

pra parametrilor și a elementelor principale ale fiecărei instalații în parte: această acționare la distanță reprezintă *telemecanizarea* instalațiilor respective (tele = distanță).

Știința care se ocupă de telemecanizare poartă numele de *telemecanică*.

Operațiile de telemecanică sînt în principiu aceleași ca și în automatică, cu deosebirea că ele sînt efectuate „la distanță". Astfel sînt: *telemăsurarea*, *telecomanda*, *telesemnalizarea* și *telereglarea*.

De exemplu, de la punctul de dispecer energetic național situat în București, se poate efectua telemăsurarea puterii produse la CTE — Ișalnița etc.

Observație. Telemecanizarea unei anumite instalații tehnologice presupune o automatizare completă a obiectivului respectiv. Astfel, dacă se telecomandă, de exemplu, pornirea din punctul de dispecer a unui grup generator într-o hidrocentrală oarecare, este necesar ca dispozitivele de automatizare din centrala respectivă să pornească pompele de ungere a lagărelor și pompele de răcire ale grupului, să deschidă vana de admisie a apei, să conecteze generatorul la rețeaua sistemului energetic etc. Neîndeplinirea dintr-o cauză oarecare a unei operații pregătitoare produce automat refuzul de a porni al grupului și telesemnalizarea la dispecer.

● **Cibernetizarea.** Cea mai înaltă formă de organizare a proceselor de producție o reprezintă cibernetizarea. Aceasta constă în prevederea la instalațiile tehnologice automatizate și telemecanizate a unor calculatoare care efectuează procese de calcul, și decizia asemănătoare cu unele procese de gîndire produse de creierul omenesc.

Calculatoarele efectuează o serie de operații matematice și logice, pe baza unui „volum de informații" primit de la instalațiile conduse și comandă o serie de modificări în cadrul sistemelor automate complexe, în scopul obținerii unor anumite performanțe tehnice ca: randament ridicat, preț de cost redus etc.

Cibernetizarea apare ca o necesitate mai ales atunci cînd ansamblul de instalații este atît de complex, încît numărul foarte mare al parametrilor și viteza mare de desfășurare a procesului obligă la efectuarea a sute sau mii de operații de calcul pe secundă, ceea ce, altfel, ar fi imposibil. De exemplu, urmărirea și comanda zborului unei rachete cosmice nu poate fi realizată decît numai cu ajutorul calculatoarelor.

Cibernetizarea, adică dirijarea prin calculator a sistemelor de automatizare conduce la realizarea unor automatizări complexe cu un număr mare de parametri controlați sau reglați; din această cauză uneori în locul termenului de *cibernetizare* se folosește acela de *automatizare complexă*.

Observație. Cibernetizarea unei instalații tehnologice nu poate fi făcută decît numai pe baza automatizării ți telemecanizării instalației respective.

În țara noastră s-au pus bazele unei industrii de elemente de automatizare prin înființarea unor fabrici ca: I.I.S. Automatica, Întreprinderea de elemente de automatizare (IEA), Întreprinderea de elemente pneumatice de automatizare (IEPA) Bîrlad, Întreprinderea de piese radio și semiconductoare (IPRS) Băneasa, Întreprinderea Electroaparataj, Întreprinderea de calculatoare electronice (ICE) în zona industrială Pipera etc.; de asemenea, au luat ființă secții de producție noi în unele întreprinderi existente, ca Electromagnetica etc.

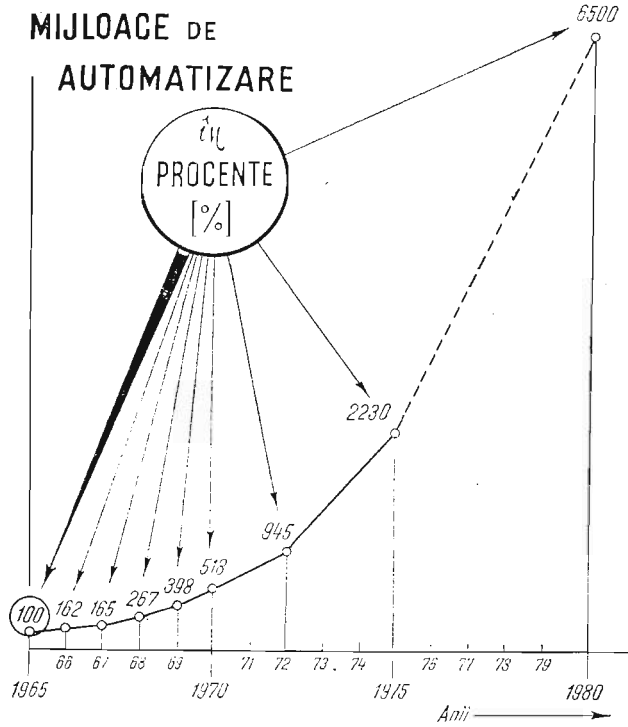


Fig. 12.2. Evoluția mijloacelor de automatizare (%).

Ca realizări în domeniul automatizării producției, obținute pînă în prezent în țara noastră, se pot cita:

— în industria siderurgică: furnalele și cuptoarele Martin parțial automatizate de la Combinatele siderurgice din Reșița și Hunedoara, laminoarele automatizate de diferite tipuri de la Combinatele siderurgice Hunedoara și Galați, fabrica de țevi din Roman etc.;

— în industria chimică: combinatele chimice cu grad ridicat de automatizare de la Borzești, Săvinești, Roznov, Turnu Măgurele, Craiova etc.;

— în industria energetică: termocentralele Borzești, Paroșeni, Luduș, Işalnița, hidrocentralele de pe Argeș, de pe Bistrița, Porțile de fier, Lotru etc.

În diagrama din figura 12.2 se prezintă evoluția pînă în prezent și în perspectivă a mijloacelor de automatizare din țara noastră.

B. ELEMENTELE COMPONENTE ALE SISTEMELOR AUTOMATE

1. NOȚIUNI GENERALE

S-a arătat că un sistem automat a rezultat din aplicarea unui dispozitiv de automatizare la o instalație tehnologică. Întregul ansamblu este format dintr-o serie de părți constitutive, numite *elementele sistemelor automate.*

a. Clasificarea elementelor de automatizare

Corespunzător scopului de automatizare propus, elementele de automatizare se construiesc într-o gamă foarte largă și variată; totuși, pe baza unor caracteristici comune tuturor acestor elemente, ele pot fi clasificate:

- **După principiul constructiv și de funcționare** se deosebesc: *traductoare, amplificatoare, relee, stabilizatoare, distribuitoare, regulatoare* etc.
- **După rolul îndeplinit într-un sistem automat** se disting: *elemente de măsurare, elemente de comparație, elemente de comandă, elemente de reacție, elemente de execuție* etc.
- **După felul energiei folosite elementele de automatizare** se împart în: *elemente electrice, elemente pneumatice, elemente hidraulice* și *elemente mixte* (de exemplu electrohidraulice).

b. Caracteristicile elementelor de automatizare

În afara caracteristicilor specifice fiecărei categorii de elemente luate în parte, există o serie de caracteristici generale, comune tuturor elementelor de automatizare, indiferent de principiul constructiv, de funcția sau de natura energiei folosite. Aceste caracteristici vor fi expuse în continuare.

Toate elementele de automatizare au cel puțin două puncte de legătură între ele, și anume intrarea I și ieșirea E. Ele se pot reprezenta în scheme sub forma unor dreptunghiuri, numite *blocuri* (fig. 12.3, *a*). Unele elemente cuprind în plus și o legătură la o sursă de energie S (electrică, pneumatică sau hidraulică), prin care elementul primește din exterior energia necesară funcționării sale.

Între valoarea mărimii fizice aplicate la intrarea unui element (mărimea de intrare i) și valoarea mărimii obținute la ieșirea acelui element (mărimea de ieșire e) există o relație de dependență, bine definită, care poate fi reprezentată grafic ca în figura 12.3, *b*. Această reprezentare grafică poartă numele de *caracteristica statică* a elementului de automatizare respectiv și ea arată cum variază mărimea de la ieșire e în funcție de mărimea de la intrare i.

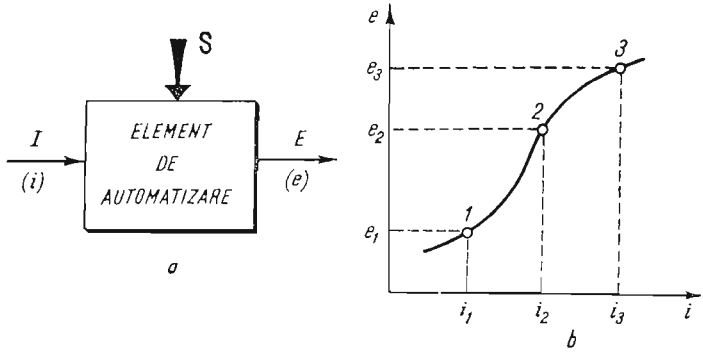


Fig. 12.3. Element de automatizare:
a — schema bloc; *b* — caracteristica statică.

Astfel, de exemplu, pentru o valoare de intrare i_1 corespunde valoarea de ieșire e_1, pentru i_2 corespunde e_2 etc.

În cele ce urmează vor fi analizate tipurile principale de elemente de automatizare, grupate pe baza principiului constructiv și de funcționare.

2. TRADUCTOARE

S-a arătat că la o instalație tehnologică se întîlnesc o serie de parametri tehnologici (mărimi), care pot fi de natură electrică (curent, tensiune, putere, energie, frecvență etc.) sau de natură neelectrică (presiune, temperatură, debit, nivel, viteză etc.).

Pentru a fi introduși într-o schemă de automatizare, parametrii tehnologici neelectrici trebuie mai întîi transformați în alte mărimi, care de obicei sînt mărimi electrice.

Elementul de automatizare care permite transformarea („traducerea") unei mărimi oarecare (temperatură, nivel etc.) într-o mărime electrică (curent, tensiune etc.) se numește *traductor*.

Traductoarele folosite în sistemele automate se pot clasifica avînd în vedere natura mărimii aplicate la intrare și natura mărimii obținute la ieșire.

● **În funcție de natura mărimii aplicate la intrare** se disting:

— *traductoare de mărimi neelectrice* (temperatură, deplasare, debit, viteză, presiune etc.);

— *traductoare de mărimi electrice* (curent, frecvență, putere, fază etc.).

● **În funcție de valorile obținute la ieșire** traductoarele pot fi:

— *neunificate;*

— *unificate.*

Prin traductoare unificate se înțeleg acele traductoare la care pentru o mărime de intrare variind între anumite limite ($x_{i0} - x_{i\,max}$) mărimea de ieșire capătă valori limită standardizate: de exemplu $I_e = 2 \ldots 10$ mA c.c. sau 0,2—1 atm presiune de aer.

Unificarea prezintă avantajul de a se putea folosi de exemplu aparate de măsură sau reglare „unificate" adică avînd aceleași valori limită la intrare.

În figura 12.4 se prezintă ca exemplu un *traductor rezistiv de presiune*. Presiunea de măsurat P este aplicată unui burduf metalic special B (capsulă manometrică) care se deplasează în sus, pe măsură ce presiunea crește, deplasînd prin tija T cursorul reostatului R. Așadar, rezistența R_x obținută între bornele c și a va crește odată cu creșterea presiunii. Pentru a pune în evidență variația rezistenței R_x, deci a presiunii P, se realizează un circuit electric ca cel din figură, și anume:

Rezistenței totale R_0 i se aplică o tensiune constantă U_0, iar voltmetrul V este legat potențiometric între bornele c și a (pe rezistența R_x). În consecință, voltmetrul V va indica tensiunea U_x, proporțională cu rezistența R_x, deci cu deplasarea d, care la rîndul său depinde de presiunea P. Scara voltmetrului este gradată direct în unități de măsură ale presiunii (atm).

În figura 12.5 este prezentat un *traductor inductiv de forță*. Acesta cuprinde un miez magnetic format dinrr-o armătură fixă C și o armătură mobilă M ținută în poziție verticală de resoartele A_1 și A_2, la o distanță de armătura fixă. Pe armătura fixă se află o bobină conținînd N spire, a cărei inductanță L_x variază cu întrefierul δ (v. cap. III).

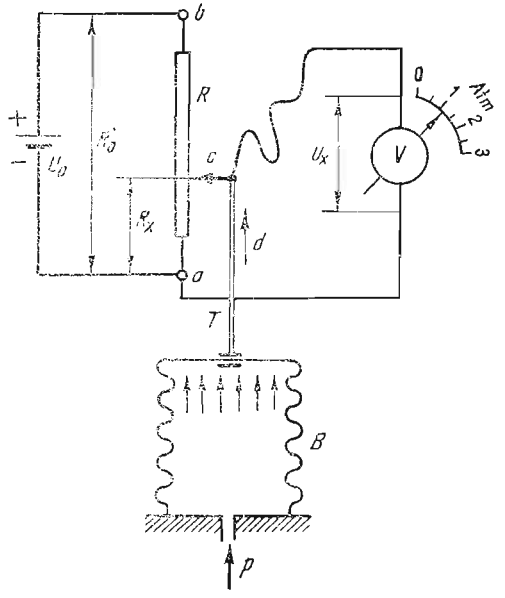


Fig. 12.4. Traductor reostatic de presiune.

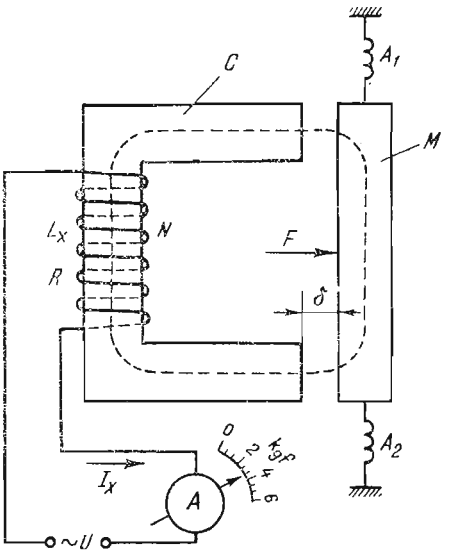


Fig. 12.5. Traductor inductiv de forță.

În aceste condiții, cînd forța crește, δ crește corespunzător și deci L_x scade. Cum curentul I_x din circuitul electric crește odată cu scăderea inductanței, el crește, deci, cu creșterea forței F.

În figura 12.6 s-a prezentat un traductor capacitiv pentru măsurarea diametrelor axelor care se prelucrează prin strunjire. Acesta cuprinde două armături curbe C_1 și C_2, avînd raza de curbură R_0 și centrul de curbură în centrul O al axului A, care se rotește fiind strunjit de cuțitul S. Notînd cu R_x raza axului, rezultă că distanța $d(d = R_0 - R_x)$ crește odată cu scăderea diametrului $2R_x$ al axului de prelucrat. Valoarea capacității C_x este determinată de cele două capacități formate din armăturile C_1 și C_2, înseriate prin axul A (v. cap. II).

Notă. Cu ajutorul acestui traductor se poate măsura (controla) diametrul piesei chiar în timpul prelucrării. Din acest motiv, sistemul poartă numele de control activ al diametrului axului A.

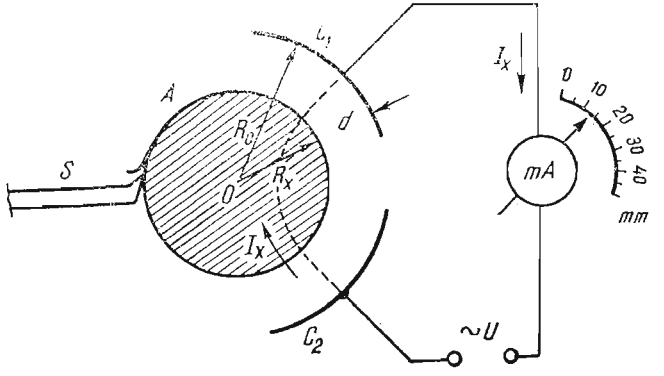


Fig. 12.6. Traductor capacitiv de dimensiuni.

Traductoarele termoelectrice sînt traductoare generatoare a căror funcționare se bazează pe tensiunea electromotoare (numită tensiune termoelectromotoare) ce apare în punctul de sudare a două materiale diferite supuse încălzirii.

Această tensiune care este proporțională cu temperatura de măsurat poate fi pusă în evidență, de exemplu, cu ajutorul milivoltmetrului. Circuitul format din cele două conductoare (termoelectrozi) poartă și numele de termocuplu: joncțiunea celor două metale se numește capătul activ al termocuplului.

Materialele folosite pentru confecționarea termocuplurilor sînt: fierul, cuprul, constantanul, platina, argintul, wolframul etc.

În țara noastră se fabrică diverse tipuri de termocupluri, dintre care cele mai obișnuite sînt termocuplurile fier-constantan, cupru-constantan, cromel-alumel etc.

Tensiunile termoelectromotoare obținute de la termocupluri sînt de obicei cuprinse între 5 și 50 mV.

3. AMPLIFICATOARE

Mărimile măsurate au în majoritatea cazurilor valori așa de mici, încît este necesară mărirea lor proporțională, adică amplificarea lor.

Așa cum s-a arătat, de exemplu, tensiunea produsă de un termocuplu este de cîțiva milivolți. Bineînțeles, o asemenea valoare de tensiune chiar dacă poate deplasa acul indicator al unui voltmetru, este incapabilă să producă un efect de comandă fără ca mai înainte să fie amplificată. Acest lucru se realizează cu ajutorul unor elemente speciale numite *amplificatoare*, la care mărimea de intrare i de o putere relativ mică poate comanda continuu o mărime de ieșire e, avînd o putere mult mai mare. Se înțelege că obținerea unui factor de amplificare mai mare decît 1 nu este posibilă decît folosind o sursă auxiliară de energie S (fig. 12.7).

Reprezentarea schematică a unui amplificator este dată în figura 12.8, *a*, iar dependența mărimii de ieșire de cea de intrare (caracteristică statică) în figura 12.8, *b*.

După natura mărimii fizice furnizate de sursa de alimentare, amplificatoarele se împart în:

— *amplificatoare de mărimi electrice* (electronice, magnetice, rotative, electromecanice etc.);

— *amplificatoare de mărimi neelectrice* (mecanice, pneumatice și hidraulice).

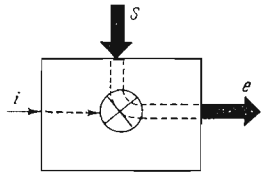


Fig. 12.7 Schema funcțională a unui amplificator.

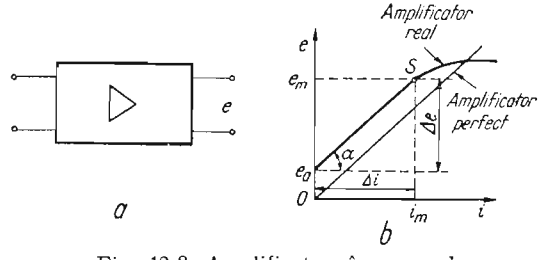


Fig. 12.8. Amplificator în general:
a — schema simbolică; *b* — caracteristica statică.

Amplificatoarele electronice au fost prezentate în capitolul 11. Amplificatoarele pneumatice și hidraulice amplifică semnalele primite de la traductoare și transmit semnalul amplificat elementelor de execuție pneumatice sau hidraulice. Elementele de execuție realizează o amplificare de putere operație concretizată în majoritatea cazurilor prin amplificarea forței, a vitezei, sau a amîndurora (puterea fiind produsul între forță și viteză). Sursa de energie folosită este aerul comprimat (elemente pneumatice) și, respectiv, uleiul sub presiune (elemente hidraulice).

4. RELEE

a. Funcționarea releelor. Construcția.

● **Principiul de funcționare.** Spre deosebire de traductoare și amplificatoare, la care mărimea de ieșire e variază continuu în funcție de mărimea de intrare i (caracteristica de funcționare este o linie continuă) releele sînt elemente la care mărimea de ieșire variază brusc (în salt) atunci cînd mărimea de intrare atinge o valoare prescrisă, numită *valoare de acționare (de excitare)*. La scăderea mărimii de intrare sub o valoare numită *valoare de revenire (de dezexcitare)*, are loc saltul invers al mărimii de ieșire.

● **Construcție.** Pentru exemplificare, în figura 12.9, *a* este prezentat un releu electromagnetic format dintr-o armătură fixă de oțel *1* și o armătură mobilă *2*, de asemenea de oțel. Pe armătura fixă este înfășurată o bobină *3*, străbătută de curentul I_i, armătura constituind astfel un electromagnet. Cînd curentul de intrare crește, armătura *2* este atrasă, însă resortul antagonist *4* se opune deplasării acesteia. Cînd curentul I_i atinge valoarea de excitare I_{i1} rezistența resortului este învinsă, armătura *2* este atrasă și prin rotirea în jurul punctului *5* închide contactul C_1. Prin închiderea acestui contact, în circuitul de ieșire va apărea un curent I_{e0}.

Se observă că valoarea curentului de ieșire depinde exclusiv de parametrii circuitului de ieșire.

$$I_{e0} = \frac{U_e}{R_s}.$$

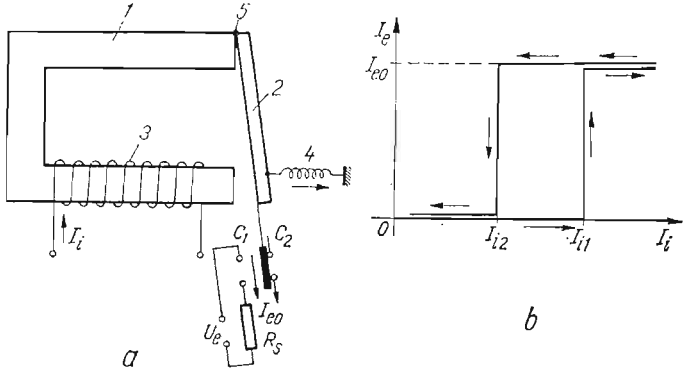


Fig. 12.9. Releu electromagnetic:
a — schema constructivă; *b* — caracteristica statică.

● **Funcționarea unui releu la excitare** poate fi prezentată deci prin următoarele relații simple (fig. 12.9, *b*):

$$I_i < I_{i1} \text{ } (C_1 \text{ deschis}), \text{ situație în care } I_e = 0:$$

$$I_i > I_{i1} \text{ } (C_1 \text{ închis}), \text{ cînd } I_e = I_{e0}.$$

● **Funcționarea unui releu la dezexcitare.** La scăderea curentului I_i armătura nu este eliberată încă, chiar dacă curentul scade puțin sub valoarea de excitație. La o anumită valoare I_{i2} a curentului I_i, numită *valoarea de dezexcitare*, și care este mai mică decît cea de excitare ($I_{i2} < I_{i1}$), armătura *2* este eliberată, contactul C_1 se deschide și I_e devine zero.

La dezexcitare, relațiile sînt deci următoarele:

$$I_i > I_{i2} \text{ } (C_1 \text{ este închis) iar } I_e = I_{e0};$$

$$I_i < I_{i2} \text{ } (C_1 \text{ se deschide) și } I_e = 0.$$

Raportul între curentul de revenire I_{i2} și cel de excitare I_{i1} se numește *factor de revenire* K_r:

$$K_r = \frac{I_{i2}}{I_{i1}} < 1.$$

Notă. Contactul C_1, care este deschis în starea normală a releului (releul neexcitat), se numește *contact normal deschis*. Contactul C_2 (fig. 12.9, *a*) care este închis în starea normală a releului, se numește *contact normal închis*.

b. Caracteristicile și utilizarea releelor

În majoritatea cazurilor, mărimea de la ieșirea releelor este de natură electrică, adică un contact stabilește brusc un curent sau o tensiune. Mărimea de intrare poate fi însă de natură electrică sau neelectrică și în funcție de aceasta se deosebesc *relee electrice* (de curent, de tensiune, de putere, de frecvență etc.) și *relee neelectrice* (de temperatură, de presiune, de debit, de viteză etc.).

Ținînd seamă de cele arătate mai sus, mărimile principale care caracterizează un anumit releu sînt:

— natura fizică a mărimii de intrare (excitare);

— puterea absorbită la intrare pentru ca releul să funcționeze (această putere poate varia între sub 1 W și circa 40 W);

— curentul (puterea) transmis de contacte în circuitul de ieșire etc.

● **Utilizări.** Releele sînt utilizate în automatică mai ales în unele domenii ca: protecția prin relee, comanda automată secvențială etc. În mod obișnuit, releele se utilizează:

— pentru comanda într-un circuit electric a unui curent de o valoare mare cu ajutorul unui curent de o valoare relativ mai mică (de exemplu, un releu este excitat la un curent de 0,2 A, iar contactul său comandă închiderea unui circuit de curent de 10 A);

— pentru multiplicarea numărului de circuite comandate de un singur circuit (de exemplu, un releu primește un semnal de la un traductor și închizînd trei contacte stabilește trei circuite distincte, cu destinații deosebite: comandă

pornirea unui motor; aprinde o lampă de semnalizare; acționează o sirenă de alarmă);

— pentru a acționa la atingerea unei anumite valori a unui parametru controlat (de exemplu, un releu este conectat în circuitul de curent al unui motor și acționează cînd acest curent atinge valoarea de 25 A — periculoasă pentru motor).

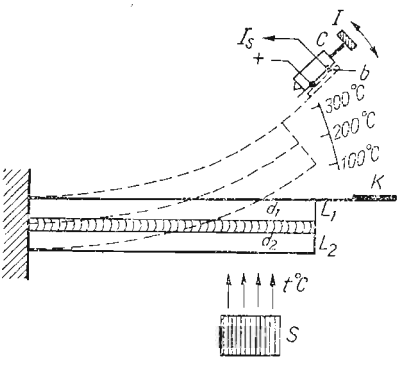


Fig. 12.10. Releu termic cu bimetal.

În figura 12.10 este prezentat un releu de temperatură cu bimetal, realizat din două lame L_1 și L_2 sudate între ele, confecționate din metale cu coeficienți de dilatare d_1 și d_2 foarte diferiți. Prin încălzire de la sursa S avînd temperatura t°C, lamele L_1 și L_2 dilatîndu-se diferit (de exemplu $d_1 < d_2$, deci alungirea lui L_2 este mai mare ca a lui L_1) bimetalul se curbează (arcuiește). Deoarece diferența de alungire crește cu temperatura — deci curbarea este cu atît mai accentuată cu cît temperatura este mai mare — rezultă că, pentru o anumită valoare t_1 a temperaturii, contactul C se va stabili, deci releul va funcționa.

Închiderea contactului C constă în atingerea bornelor a și b de către lama metalică K, ceea ce are ca efect, de exemplu, stabilirea curentului de sarcină I_s.

Schimbînd poziția contactului C, cu ajutorul șurubului de fixare I de-a lungul unei scări gradate (t°C), releul poate fi reglat să funcționeze la diverse valori ale temperaturii.

5. ELEMENTE DE EXECUȚIE

În sistemele de comandă și reglare automată, elementele de execuție constituie acea parte care face trecerea de la dispozitivul de automatizare la instalația tehnologică.

Elementul de execuție reprezintă, așadar, partea prin care dispozitivul de automatizare acționează asupra instalației tehnologice.

Deschiderea sau închiderea unui ventil dintr-o conductă, a unui întrerupător într-o rețea electrică, deplasarea cursorului unui resort în circuitul de excitare al unui generator sincron etc., sînt tot atîtea moduri de intervenție într-un proces sau instalație tehnologică.

● **Elemente componente.** Un element de execuție este format dintr-un organ de execuție (ventil, întreruptor, clapetă, reostat etc.) și un motor de execuție (numit uneori și servomotor) al acestuia.

ELEMENTE DE EXECUȚIE = ORGAN + MOTOR (DE EXECUȚIE)

În general, elementele de execuție au ca principiu de funcționare fie variația unui debit de fluid prin modificarea secțiunii de trecere, fie modificarea cantității de substanță (energie) produsă de o sursă.

Modificarea cantității de substanță sau energie poate fi realizată în două moduri:

— *continuu* — atunci cînd cantitatea respectivă trebuie modificată în mod continuu între două valori limită. De exemplu, un ventil poate modifica continuu cantitatea (debitul) de fluid ce trece printr-o conductă, între zero (ventil închis) și valoarea maximă corespunzătoare ventilului deschis;

— *discontinuu* — atunci cînd cantitatea respectivă este modificată discontinuu (discret), numai pentru două valori limită dintre care una este în general zero (tot sau nimic). De exemplu, la un întreruptor electric avînd numai două poziții posibile, deschis sau închis, curentul ce-l străbate poate avea numai două valori: zero și valoarea nominală respectivă.

● **Tipuri constructive.** Marea diversitate a proceselor tehnologice supuse automatizării a impus o mare diversitate de elemente de execuție.

Ținînd seamă de natura sursei de energie pentru alimentarea motoarelor, elementele de execuție se pot clasifica în: *electrice, pneumatice* și *hidraulice.*

C. EXEMPLE DE SISTEME AUTOMATE

1. SISTEME DE MĂSURARE AUTOMATĂ

a. Măsurarea automată

Spre deosebire de măsurarea manuală, prin care omul aplică mărimea de măsurat direct unui aparat (de exemplu măsoară temperatura unui cuptor cu ajutorul unui termometru), măsurarea automată necesită o serie de elemente de automatizare (de exemplu un traductor de temperatură — un termocuplu — un amplificator de tensiune, un stabilizator pentru menținerea constantă a tensiunii sursei de alimentare etc.) precum și o legare corespunzătoare a acestor elemente (scheme de măsurare etc.). Mărimea de măsurat suferă astfel o serie de transformări intermediare și poate fi pusă în evidență (afișată) fie cu un aparat electric indicator (de exemplu un miliampermetru cu ac indicator) fie cu ajutorul unui aparat înregistrator — care înscrie o diagramă pe hîrtie.

Elementul de bază într-un sistem de măsurare automată este *traductorul.*

b. Prezentarea valorii mărimilor măsurate

Cel mai simplu mod de prezentare a datelor măsurate este *afișarea* (indicarea) acestora cu ajutorul unor aparate indicatoare.

● **Afișarea continuă** sau **analogică** se realizează cu ajutorul aparatelor cu ac indicator, ca de exemplu microampermetre sau milivoltmetre, care au scară gradată (etalonată) direct în unități ale mărimii măsurate.

● **Afișarea discontinuă** sau **numerică** se face în prezent în cod numeric zecimal, adică în cifre de la 0 la 9.

Valoarea mărimii măsurate obținută de la traductor prin amplificator, este transformată în cod zecimal cu ajutorul unui *convertor analogic-numeric,*

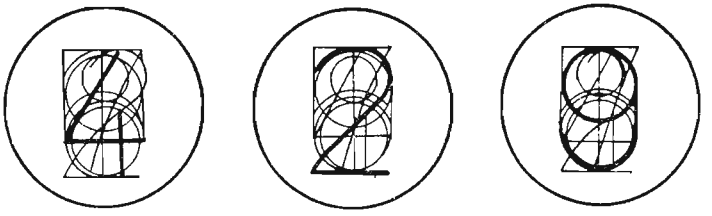


Fig. 12.11. Afișare numerică cu tuburi electronice NIXIE.

care transformă mărimea continuă (analogică) într-un cod de impulsuri (mărime numerică). Impulsurile respective sînt aplicate unor aparate speciale de afișare numerică (de exemplu, indicatorul cu cifre al contoarelor pentru consumul de energie electrică).

● **Afișarea suprapusă** este metoda cea mai modernă utilizată în măsurarea numerică. Cifrele sînt suprapuse, dar fiecare permite vizibilitatea cifrelor din spate.

În figura 12.11 este prezentată o variantă a acestui procedeu realizată cu tuburi electronice cu neon avînd un anod și zece catozi. Catozii sînt realizați din sîrmă, îndoită în formă de cifră; prin aplicarea tensiunii între anod și unul din catozi, sîrma (cifra) respectivă apare luminoasă. Aceste tipuri de tuburi electronice de afișare numerică sînt cunoscute și sub denumirea comercială de tuburi NIXIE (citește nixi).

Datele măsurate pot fi prezentate și prin înregistrarea lor pe benzi de hîrtie cu ajutorul unui aparat înregistrator.

Înregistratoarele cu diagramă rulantă funcționează pe principiul aparatelor electrice obișnuite (ampermetre, voltmetre etc. — v. cap. 8 —), avînd însă acul indicator prevăzut cu peniță. În fața peniței, perpendicular pe direcția de mișcare a acesteia se deplasează cu viteză constantă o bandă (diagramă) de hîrtie pe care se înregistrează variația în timp a mărimii măsurate.

Ca exemplu, în figura 12.12 este prezentat un aparat înregistrator automat care permite înregistrarea continuă a trei mărimi diferite (greutate — % — , avansare — m — și putere — kW —), din același proces tehnologic (de exemplu o instalație de forat).

Banda de hîrtie se deplasează cu viteză constantă (de exemplu 20 mm/h), fiind antrenată de un mecanism de ceasornic; deci, pe verticală este marcat timpul, iar deplasarea pe orizontală a peniței (care are în același timp și un ac indicator) marchează valorile mărimilor de măsurat.

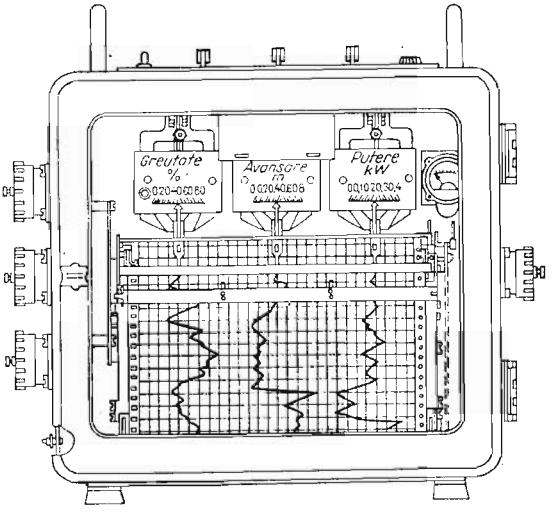


Fig. 12.12. Aparat înregistrator automt cu trei piste.

Aparatele cu înregistrare continuă dau erori mari de măsurare datorită consumului mare de putere provocat de frecarea peniței de hîrtie.

Notă. Uneori mărimile măsurate pot fi înregistrate pe „benzi" sau cartele perforate sau pe benzi magnetice, în scopul introducerii lor într-un calculator.

c. Exemplu de sistem de măsurare automată

În figura 12.13, este arătat un exemplu de măsurare automată a turației n a unui ax în rotație R. Solidar cu acest ax este montat discul D care are un orificiu H prin care poate trece fluxul luminos Φ, dat de o sursă de lumină (lampa B). Fluxul Φ este concentrat de lentila L_1, într-un fascicul luminos Φ_1, iar fluxul Φ_2 de la ieșirea din orificiul H este distribuit de lentila L_2 celulei fotoelectrice F. După cum se știe, rezistența R_F a tubului respectiv scade cu creșterea intensității fluxului luminos aplicat. Tubul fotoemisiv (celula fotoelectrică) este introdus într-o schemă electronică conținînd un tub T în al cărui circuit anodic se montează miliampermetrul A. Cînd discul D se rotește ajungînd cu orificiul H în dreptul fasciculului luminos, la celula fotoelectrică ajunge un impuls luminos și $\Phi_2 = \Phi_1$. În restul timpului discul oprește raza luminoasă, deci $\Phi_2 = 0$. Astfel, la fiecare rotație a discului se obține un impuls luminos.

Frecvența impulsurilor luminoase (numărul de impulsuri pe secundă) crescînd cu turația n, rezultă că valoarea medie a fluxului Φ_2, dacă Φ_1 rămîne constant, crește odată cu turația. Ca urmare, rezistența internă R_F a celulei F va scădea, ceea ce va avea ca efect creșterea tensiunii de grilă U_G în conformitate cu relația:

$$U_G = E_a \frac{R_0}{R_0 + R_F}$$

și deci cu creșterea curentului anodic I_A.

În consecință, curentul anodic I_A va crește (v. caracteristicile de grilă ale triodei) odată cu creșterea turației n. Miliampermetrul A străbătut de curentul I_A este etalonat direct în rotații pe minut.

Observație. Trebuie precizat că în locul montajului cu celulă fotoelectrică, deoarece fluxul Φ_2 este de fapt o succesiune de impulsuri s-ar putea monta un contor de impulsuri (de asemenea

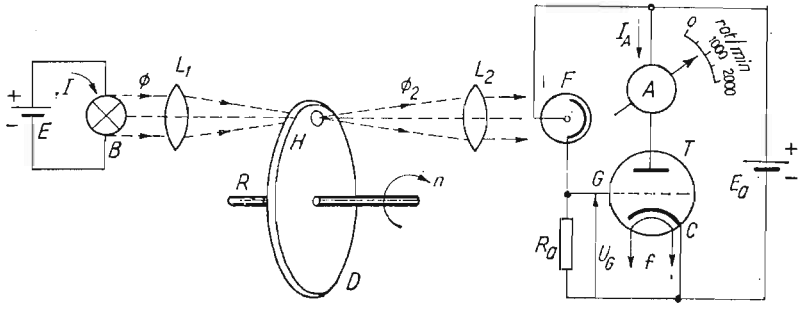


Fig. 12.13. Exemplu de sistem de măsurare a turației.

electronic), care va înregistra direct numărul total de rotații ale discului, D. Dacă, de exemplu, axul R este solidar cu axul unei pompe de lichid, numărul de impulsuri contorizat reprezintă la o anumită scară volumul total de lichid pompat.

2. SISTEME DE CONTROL AUTOMAT

Controlul este o operație mai complexă, în care măsurarea diverșilor parametri ai unei instalații constituie doar mijlocul de informare în legătură cu funcționarea acesteia (normală sau nu). Dacă, de exemplu, prin măsurarea unei presiuni se poate afla valoarea acesteia la diverse momente date (6, 7, 8 ... atm), prin controlul aceleiași presiuni se constată doar dacă presiunea respectivă este mai mică decît 10 atm (indiferent de valoare) sau mai mare decît 10 atm (indiferent de valoare). Se observă din acest exemplu că pentru control există numai două stări posibile:

— starea 0 (zero): $P < 10$ atm;

— starea 1 (unu): $P > 10$ atm.

Un asemenea proces (sau element), care nu are decît două stări posibile (0 sau 1) se numește *proces binar* (sau *proces bivalent*).

Astfel, de exemplu, o lampă poate fi aprinsă (1) sau stinsă (0); un motor poate fi pornit (1) sau oprit (0); o piesă prelucrată poate fi bună (1) sau rebut (0) etc.

Uneori controlul se poate referi la ieșirea din anumite limite a unui parametru. De pildă, folosind același exemplu de mai sus, prin control se poate stabili:

— starea 0 (zero): dacă presiunea P este cuprinsă între limitele de 8 atm și 10 atm ($8 \text{ atm} < P < 10$ atm);

— starea 1 (unu): dacă presiunea P se află în afara acestor limite ($P < 8$ atm sau $P > 10$ atm).

Controlul automat este concretizat în final fie printr-o semnalizare, fie printr-o comandă.

Semnalizarea poate fi *optică* — de exemplu lampa verde aprinsă (starea 0) ori lampa roșie aprinsă (starea 1) — sau *acustică*, cu ajutorul unei sonerii sau al unui claxon (hupă), care nu sună (starea 0) sau sună (starea 1).

Comanda prin care se poate concretiza un control automat poate fi, de exemplu, aceea de separare a unor piese bune (starea 1) de piese rebutate (starea 0). Un asemenea tip de control automat se mai numește și *sortare automată*.

Deoarece, așa cum s-a arătat, controlul automat are în vedere numai una sau două valori ale unei mărimi date, elementele cele mai des folosite pentru măsurarea valorilor respective sînt releele.

În figura 12.14 este prezentat un sistem de control automat care permite controlul dimensiunilor (și anume al unor diametre d_A, d_B, d_C, d_D și d_E) unui arbore cilindric în trepte (cum ar fi cel al rotorului unui generator sau motor electric). Arborele este introdus (manual sau automat) într-un dispozitiv care îl centrează pe ax, astfel ca tijele unor relee mecanice R_A, R_B, R_C, R_D și R_E ating (palpează) porțiunile de arbore cu diametrele d_A, d_B ... respectiv d_E.

Cu ajutorul unor resorturi (nefigurate), tijele releelor sînt apăsate pe arborele controlat. Fiecare releu mecanic este prevăzut cu cîte trei contacte: contactul de maxim *1*, contactul intermediar *2* și contactul de minim *3*.

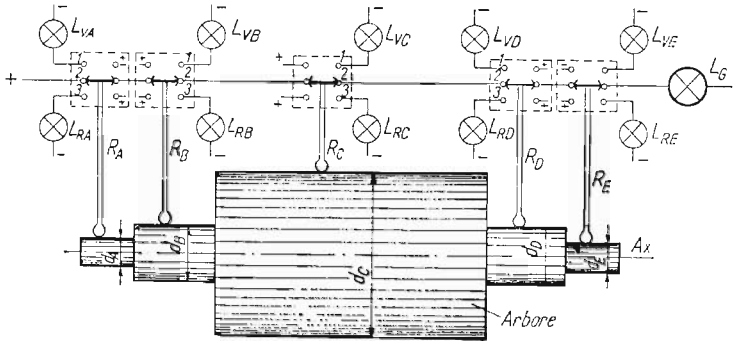


Fig. 12.14. Exemplu de sistem de control automat al dimensiunilor.

Cînd toate diametrele d_A, d_B ... d_E au valorile normale, adică admisibile, toate releele omoloage R_A, R_B ... R_E au închise contactele intermediare *2*, care sînt legate în serie şi transmit un impuls pozitiv lămpii galbene L_G, semnalizînd astfel optic că arborele controlat este în întregime bun.

Cînd unul (sau mai multe) dintre diametrele d_A, d_B ... d_E este mai mare decît valoarea normală, tija releului corespunzător este împinsă în sus şi se închide contactul de maxim *1*, aprinzînd lampa verde L_V corespunzătoare acelui diametru (de exemplu lampa L_{VB} se aprinde cînd diametrul d_B este mai mare decît dimensiunea normală). În acelaşi timp, deschizîndu-se contactul *2* se întrerupe circuitul lămpii L_G şi aceasta se stinge.

Dacă unul (sau mai multe) dintre diametrele d_A, d_B ... d_E este mai mic decît valoarea normală, tija releului corespunzător coboară şi se închide contactul de minim *3*, aprinzînd lampa roşie, L_R corespunzătoare acelui diametru: de asemenea, lampa L se stinge, datorită deschiderii contactului *2*.

Trebuie menţionat că distanţele de deplasare de la un contact de maxim la cel de minim sînt foarte mici, ele cuprinzînd toleranţele de prelucrare ale arborelui.

Observaţie. Arborele poate fi controlat chiar în momentul cînd este prelucrat (de exemplu, la strung). Un asemenea control se numeşte *control activ*.

3. SISTEME DE COMANDĂ — SEMNALIZARE AUTOMATĂ

a. Comanda

Prin *sisteme de comandă automată* se înţeleg acele sisteme care pe baza modificării unor parametri din instalaţia tehnologică, asigură operaţii de modificare a stării unor organe sau utilaje din instalaţia respectivă.

De exemplu, pe baza unei variaţii stabilite a presiunii, nivelului, temperaturii etc. se realizează în mod automat pornirea sau oprirea unei pompe, a unui ventilator, deschiderea sau închiderea unei vane sau ventil etc.

Se constată de aici că operația de comandă are un aspect bivalent, corespunzător celor două stări posibile ale agregatului: starea 0 (motor oprit, vană închisă etc.) sau starea 1 (motor pornit, vană deschisă etc.).

Notă. Deoarece în majoritatea cazurilor operațiile de comandă se efectuează asupra motoarelor electrice care acționează diverse sarcini (pompe, ventilatoare, macarale, poduri rulante etc.) o mare parte din sistemele de comandă automată se întîlnesc în tehnică sub denumirea de *comandă automată a acționărilor electrice.*

b. Semnalizarea

În general, operația de comandă este însoțită de semnalizare, care permite o informare, de asemenea bivalentă, asupra poziției sau a stării agregatelor, asupra mărimilor din proces etc.

c. Exemplu de sistem de comandă-semnalizare

În figura 12.15 este arătat un sistem de comandă-semnalizare a unei instalații de iluminat exterior.

Instalația tehnologică supusă automatizării este formată (simplificat) din cele șase lămpi de iluminat L_1, L_2 ... L_6 care produc fluxul luminos Φ_A necesar iluminării exterioare a unei incinte industriale sau a unei străzi. Lămpile se aprind prin închiderea întrerupătorului I care le alimentează de la tensiunea rețelei de 220/380 V. Întreruptorul are aici funcția de element de execuție.

Elementul sensibil (de măsurare) este un releu fotoelectronic format din celula fotoelectrică F, amplificatorul cu tranzistor T și releul maximal de curent R_C.

Tema de funcționare a sistemului automat respectiv este următoarea: cînd vine seara și lumina naturală (de la soare) scade, adică fluxul luminos natural Φ_N se micșorează, este necesar să se închidă întreruptorul I pentru a se asigura iluminarea artificială în timpul nopții prin fluxul luminos Φ_A.

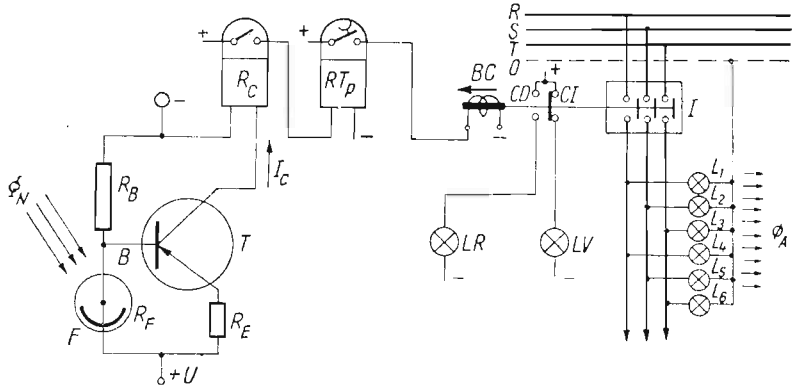


Fig. 12.15. Exemplu de sistem de comandă-semnalizare a unei instalații de iluminat exterior.

Dimineața, lumina electrică trebuie stinsă: de asemenea, trebuie semnalizată această funcționare.

● **Funcționare.** În timpul zilei fluxul luminos natural Φ_N este intens și deci rezistența internă R_F a celulei F care este iluminată de acest flux este scăzută. Ca urmare, baza B a tranzistorului T are un potențial scăzut, deci curentul de colector I_c este de asemenea redus.

Contactul CI, de tip normal închis al întreruptorului I transmite + la lampa verde LV, care aprinzîndu-se pe panoul central de semnalizare, semnalizează optic: ÎNTRERUPTOR DESCHIS.

Cînd vine seara și fluxul luminos Φ_N începe să scadă, rezistența internă a celulei F începe să crească, baza B capătă potențiale din ce în ce mai mari și curentul I_C crește.

La un anumit grad de întunecare, corespunzător momentului la care trebuie aprinsă lumina, curentul I_C ajunge la valoarea de excitare a releului maximal de curent R_C. Acesta își închide contactul său normal deschis și transmite + releului de timp RT_P. Contactul releului de timp se închide cu temporizare și excitînd bobina BC comandă închiderea întreruptorului I. Lămpile L_1, L_2 ... L_6 se aprind, producînd fluxul luminos artificial Φ_A și ard tîn tot timpul nopții.

Prin închiderea întreruptorului I se deschide contactul auxiliar CI stingînd lampa verde de semnalizare LV și se închide contactul CD care aprinde lampa roșie LR. Aceasta semnalizează poziția întreruptor închis.

Dimineața fenomenul are loc invers, adică fluxul luminos crește micșorînd rezistența R_F a celulei F, potențialul bazei B scade, deci curentul I_C scade producînd dezexcitarea releului de curent. Contactul releului de curent se deschide, ceea ce are ca efect revenirea releului de timp și declanșarea întreruptorului I, deci stingerea lămpilor de iluminat L_1, L_2 ... L_6. Concomitent se stinge lampa LR și se aprinde lampa LV.

4. SISTEME DE REGLARE AUTOMATĂ (SRA)

Într-o instalație tehnologică este deseori necesar ca unul sau mai mulți parametri să fie menținuți la anumire valori constante, independent de cauzele perturbatoare care fac ca acești parametri să varieze.

De exemplu, așa cum s-a arătat în paragraful A, presiunea sau temperatura aburului la cazan într-o termocentrală este perturbată de variația debitului de abur absorbit de turbină, de debitul de combustibil ars în cazan, de temperatura apei de alimentare a cazanului etc.

a. Fazele reglării

Menținerea constantă * a unei mărimi oarecare dintr-un proces tehnologic poartă denumirea de reglare sau reglaj. Procesul de reglare cuprinde următoarele faze distincte: *măsurarea, compararea* și *comanda.*

● **Măsurarea** parametrului supus reglării în scopul obținerii valorii reale a acelui parametru constituie prima fază a procesului de reglare. Prin metodele

* sau modificarea ei după o anumită lege.

de măsurare cunoscute se constată, de exemplu, că temperatura reală a aburului este $t_r = 400°C$.

● **Compararea** valorii reale a parametrului măsurat, cu o valoare de consemn (de referință). Prin valoare de consemn se înțelege valoarea constantă la care trebuie să fie menținut parametrul prin procesul de reglare. De exemplu, se compară temperatura reală $t_r = 400°C$ cu temperatura de consemn, care poate fi de pildă $t_c = 420°C$ și se constată că există o abatere de temperatură (o eroare) $\Delta t = 400 - 420 = -20°C$.

● **Comanda** diferitelor elemente de execuție din instalație în scopul aducerii valorii reale la valoarea de consemn, sau cum se mai spune, în scopul anulării abaterii. În exemplul dat se mărește debitul de combustibil introdus în focar, pentru a mări temperatura de la 400°C la 420°C.

b. Reglarea manuală

Procesul de reglare este, așadar, o operație complexă de măsurare și comandă. El poate fi executat fie manual, fie automat. Reglarea este manuală, atunci cînd un operator uman urmărește variația parametrilor măsurați, compară valorile citite cu cea de consemn și manevrează organele de execuție (vane, robinete, întreruptoare etc.), în scopul reducerii sau anulării abaterii.

Reglarea manuală este calitativ inferioară celei automate, deoarece:

— procesul de reglare manuală este foarte obositor pentru om;

— omul nu poate aprecia suficient de corect cît de mult trebuie influențat procesul tehnologic pentru ca eroarea să se anuleze;

— chiar dacă pe baza unei experiențe îndelungate omul poate aprecia cît trebuie modificat procesul tehnologic (în exemplul dat cît de mult trebuie deschis ventilul de admisie a combustibilului în focar pentru ca temperatura să crească de la 400 la 420°C), totuși între timp se poate ca valoarea reală să se fi modificat din nou, în urma variațiilor mărimilor perturbatoare.

c. Reglarea automată

Reglarea automată se realizează de un dispozitiv special, numit *regulator*.

Ansamblul regulator plus instalația tehnologică constituie *sistemul de reglare automată* (SRA).

Schema bloc a unui SRA este prezentată în figura 12.16.

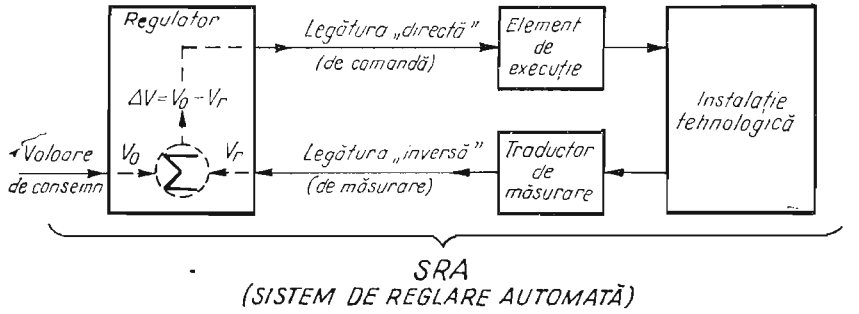


Fig. 12.16. Schema bloc a unui SRA.

Se observă că, de exemplu, spre deosebire de sistemele de măsurare sau comandă automată, la care între instalația tehnologică și dispozitivul de automatizare există o singură legătură (de măsurare sau de comandă), la SRA există:

— o legătură de la regulator la instalația tehnologică, numită *legătură directă* sau *de comandă*, prin care regulatorul comandă prin intermediul organului de execuție, modificarea mărimii reglate;

— o legătură de la instalația tehnologică la regulator, numită *legătură inversă* sau *legătură de măsurare*, prin care regulatorul primește valoarea reală V_r a mărimii reglate de la instalația tehnologică printr-un traductor de măsurare.

Notă. Regulatorul primește și valoarea de consemn V_0 și reacționează pe baza informației primite pe legătura inversă. Din această cauză această legătură se mai numește și *legendă de reacție*.

Atenție! Sistemul acționează numai atît timp cît abarerea ΔV între cele două valori — de consum și de măsurare — ($\Delta V = V_0 - V_r$) este diferită de zero.

Notă. Deoarece, așa cum se constată din figura 12.16, legăturile între regulator și instalația tehnologică constituie un circuit închis, sistemele de reglare automată se mai numesc și *sisteme automate cu circuit închis*. Spre deosebire de acestea, celelalte sisteme, automate ca de exemplu cele de măsurare, de control, de comandă, de semnalizare etc. se mai numesc și *sisteme cu circuit deschis*.

Regulatoarele automate se clasifică în două categorii principale: *regulatoare directe* și *regulatoare indirecte*.

● **Regulatoarele directe** sau **primare** acționează asupra instalației tehnologice în mod direct (nemijlocit), folosind chiar energia primară primită prin legătura de măsurare. Regulatoarele directe nu necesită deci o sursă de energie suplimentară pentru comanda instalației tehnologice.

● **Regulatoarele indirecte** sau **secundare** primesc prin legătura de măsurare un semnal de putere redusă și acționează asupra instalației tehnologice pe baza unei energii separate (secundară) primite din afară.

Dacă mărimea de comandă x_c produsă de regulator este proporțională cu abaterea ΔV ($x_c = K_p \Delta V$) regulatorul se numește de tip P (proporțional); dacă este proporțional cu derivata abaterii $x_c = K_D \cdot \frac{d\Delta V}{dt}$, regulatorul este de tip D (derivativ), iar dacă este proporțională cu integrala abaterii $x_c = K_I \int \Delta V \, dt$, regulatorul este de tip I (integrator). În practică se întîlnesc regulatoare de tip P, PD, PI, PID etc.

d. Clasificarea SRA

În funcție de tipul de regulator utilizat, sistemele de reglare automată primesc și ele numele de SRA *directe* și, respectiv, SRA *indirecte*.

Mărimea de consum este considerată ca mărime de intrare I a SRA, iar mărimea realizată (mărimea reglată) este mărimea de ieșire E a SRA.

Pe baza acestor noțiuni, un SRA poate fi definit ca un sistem automat la care mărimea de ieșire trebuie adusă la aceeași valoare cu cea de intrare.

Din punctul de vedere al modului cum poate varia mărimea de intrare se deosebesc următoarele tipuri de SRA:

— *cu consemn fix;*

— *cu consemn programat;*

— *de urmărire.*

● La **SRA cu consemn fix** mărimea de intrare este menținută permanent la o valoare constantă și deci mărimea de ieșire va fi și ea constantă.

De exemplu, în sistemul energetic național frecvența rețelei este menținută permanent la valoarea constantă $f_0 = 50$ Hz (frecvența de consemn) datorită sistemelor de reglare automată a frecvenței (turației) generatoarelor.

● La **SRA cu consemn programat** mărimea de intrare este menținută, după un anumit program necesar realizării procesului tehnologic la diverse valori constante.

De exemplu, la un cuptor de tratament termic al unor piese, temperatura de consemn t_0 este menținută constantă, însă după următorul program: timp de 60 min $t_0 = 650°C$, apoi 20 min $t_0 = 970°C$ și în sfîrșit, 180 min $t_0 = 325°C$.

● **Sistemele de urmărire,** numite uneori și **servomecanisme,** sînt aplicate în special la deplasări unghiulare sau liniare. Variația mărimii de intrare este aleatoare (oricum), iar mărimea de ieșire urmărește pe cea de intrare.

Ca exemplu de sisteme de urmărire se pot cita mașinile automate de copiat, sistemele de dirijare a antenelor radar și telescopice, a tunurilor cu tragere automată, a sistemelor de dirijare a zborului la avioane mari etc.

e. Exemplu de SRA de nivel cu regulator direct

În figura 12.17 este prezentat un sistem de reglare automată a nivelului într-un rezervor de apă.

Instalația tehnologică este un rezervor R, numit și castel de apă, situat la o anumită înălțime, de unde, prin cădere liberă apa este trimisă prin conducte la diverși consumatori industriali sau casnici (rețeaua de distribuție). Alimentarea cu apă este asigurată prin pomparea de la una sau mai multe captări de apă (puțuri sau izvoare). Nivelul N al apei în rezervor trebuie menținut în permanență la o valoare constantă N_0 (de consemn) pentru a se asigura:

— presiune hidrostatică suficientă în rețeaua de distribuție;

— o rezervă de apă, în caz de defect în instalația de alimentare cu apă.

Deoarece debitul de apă consumată este variabil în timp (fiecare consumă cînd vrea și cît vrea), rezultă că pentru menținerea nivelului constant N_0 este necesar ca și debitul apei de alimentare să fie de asemenea variabil. Acest lucru este realizat ca în figura 12.17, cu un regulator de nivel cu acțiune directă.

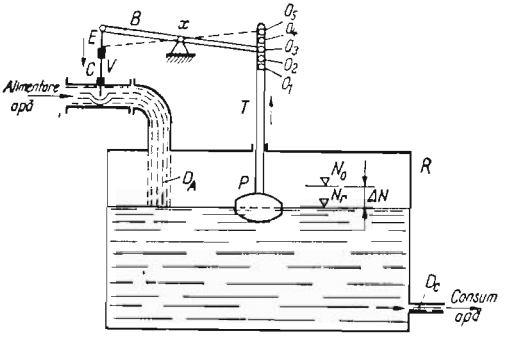


Fig. 12.17. Exemplu de SRA de nivel.

Funcționarea are loc în felul următor:

Cînd nivelul N al apei în rezervor scade la valoarea N_r, conse-

cință a creșterii debitului consumat D_c (cauza perturbatoare), plutitorul P și tija T coboară trăgînd în jos pîrghia B. Întrucît B este articulată în punctul X, ea va trage în sus clapeta C a vanei V (element de execuție). Prin ridicarea clapetei se mărește secțiunea de deschidere a vanei și deci debitul apei de alimentare va crește. Aceasta va avea ca efect creșterea nivelului apei în rezervor pînă la atingerea cotei N_0. Dacă pe măsură ce nivelul apei în rezervor crește (deoarece debitul de apă consumată scade), procesul are loc în mod invers, adică: plutitorul P se ridică și împinge prin tija T pîrghia B, care la rîndul său împinge clapeta C. Prin aceasta se micșorează secțiunea vanei V și se reduce debitul de apă de alimentare. Totul este astfel aranjat încît la atingerea nivelului N_0 vana V să fie închisă complet.

Observație. Sistemul prezentat are o funcționare în circuit închis, deci schema sa bloc este cea din figura 12.16.

Din exemplul dat se constată că valoarea de consemn N_0 este acea valoare a nivelului N la care vana V este închisă. Această valoare de consemn corespunde punctului de articulație O_3 dintre tija T și brațul B. În cazul articulării în punctul O_4 sau O_5, nivelul de consemn este mai scăzut, deoarece vana închide complet pentru o lungime mai mare a tijei T, deci pentru o poziție mai coborîtă a plutitorului P. În cazul articulării în punctele O_2 sau O_1 situația este inversă. Rezultă de aici posibilitatea modificării mărimii de consemn a sistemului de reglare.

f. Exemplu de SRA cu regulator indirect

În figura 12.18 este prezentat un sistem de reglare automată a tensiunii unui generator trifazat sincron. Generatorul G este antrenat de o turbină (nefigurată) cu turația sincronă n_0. După cum se știe, tensiunea electromo-

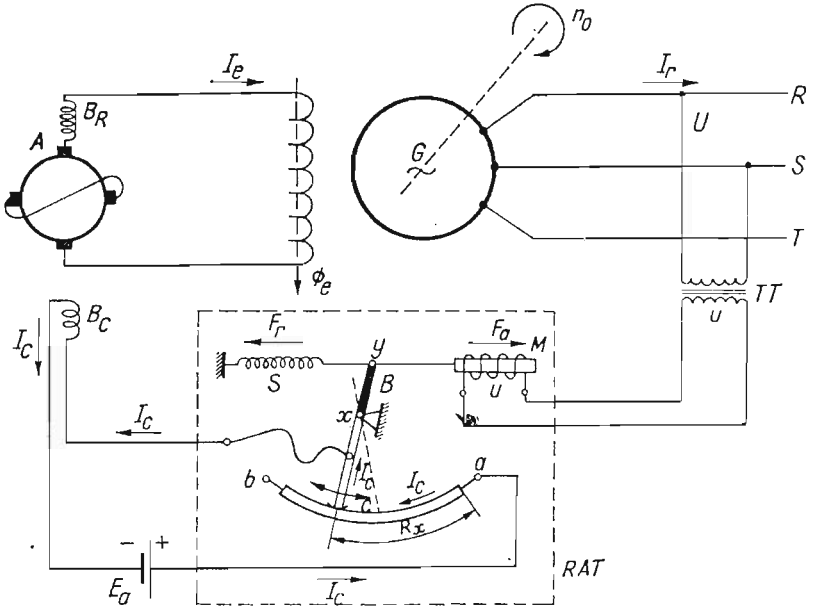


Fig. 12.18. Exemplu de SRA de tensiune.

toare E produsă de generator este proporțională cu fluxul de excitație Φ_e, deci cu curentul de excitație I_e. La rîndul său, curentul I_e este proporțional cu curentul I_e aplicat amplificatorului rotativ A (amplidina). Tensiunea U la bornele generatorului este proporțională cu tensiunea electromotoare E (v. cap. 3).

Se poate spune deci că tensiunea U la bornele generatorului este direct proporțională cu curentul I_c de comandă a amplidinei.

Regulatorul automat de tensiune RAT cuprinde reostatul circular R cu cursorul C deplasat de pîrghia B articulată în punctul x. Asupra pîrghiei respective acționează motorul solenoidal M care, alimentat cu tensiunea u produce forța activă F_a. În sens contrar trage resortul spiral S, care produce forța de întindere F_r. Rezistența R_x a reostatului R, cuprinsă între cursorul C și borna a, este înseriată cu bobina de comandă B_c a amplidinei și, fiind alimentată de o sursă de tensiune continuă E_a, este străbătută de curentul continuu I_c. Tensiunea u este obținută din tensiunea U prin reducerea acesteia cu ajutorul transformatorului de tensiune TT (raport de transformare U/u) (v. cap. 8).

În funcționarea normală regulatorul are o poziție de echilibru dată de relația:

$$F_a = F_r,$$

cînd tensiunea la bornele generatorului are valoarea de consemn U_0:

$$U = U_0.$$

Funcționarea regulatorului este următoarea: cînd curentul I_r (mărimea perturbatoare), absorbit de rețea crește, tensiunea (mărimea reglată) va scădea, adică apare o abatere ΔU pozitivă:

$$\Delta U = U_0 - U_r.$$

Deoarece tensiunea u scade proporțional cu U, înseamnă că forța F_a va scădea. Ca urmare punctul y se va deplasa spre stînga datorită forței F_r a resortului S.

Prin intermediul pîrghiei B cursorul C se va deplasa spre dreapta, adică R_x va scădea. Notînd cu R_c rezistența bobinei B_c, curentul de comandă I_c va avea expresia:

$$I_c = \frac{E_a}{R_c + R_x}$$

înseamnă că prin scăderea rezistenței R_x curentul de comandă I_c va crește.

Așa cum s-a arătat la începutul acestui paragraf, curentul I_c amplificat produce creșterea tensiunii electromotoare E, deci restabilirea tensiunii U la valoarea U_0. Cele arătate pot fi prezentate simbolic astfel:

$$I_r \nearrow \underline{U \searrow u} \searrow F_a \searrow R_x \searrow I_c \nearrow I_e \nearrow E \nearrow \underline{U \nearrow}$$

Cînd curentul I_r absorbit de rețea scade, procesul de reglare are loc în sens invers, astfel că el poate fi urmărit în figură pe baza următoarei reprezentări simbolice:

$$I_r \searrow \underline{U \nearrow u} \nearrow F_a \nearrow R_x \nearrow I_c \searrow I_e \searrow E \searrow \underline{U \searrow}$$

Asemenea regulatoare de tensiune sînt folosite la generatoarele electrice de pe locomotiva diesel-electrică fabricată la Întreprinderea Electroputere-Craiova.

REZUMAT

● Automatizarea proceselor de producție reprezintă introducerea unor dispozitive de automatizare la instalațiile tehnologice (turbine electrice, sonde, linii de fabricație, pompe etc.) în scopul desfășurării proceselor de producție fără participarea omului (automat) însă pe baza unui plan (program) stabilit de către om.

● Traductoarele sînt elemente de automatizare care transformă o mărime oarecare (temperatură, presiune, debit, viteză etc.) într-o mărime electrică, în scopul măsurării acelei mărimi.

● Amplificatoarele sînt elemente folosite în automatizare care măresc (planifică) proporțional cu un factor de amplificare mărimea aplicată la intrarea lor. Necesitatea amplificatoarelor rezultă din faptul că unele mărimi (de exemplu cele obținute de la traductoare) nu au o putere suficientă pentru a acționa direct asupra unui aparat, de exemplu asupra unui motor de execuție dintr-o instalație de automatizare.

● Releele sînt elemente de automatizare cu funcționare discontinuă la ieșire (închidere-deschidere a unui contact), atunci cînd mărimea de la ieșire depășește (sau scade) sub o anumită valoare.

● Elementele de execuție sînt acele părți ale unu sistem automat prin care dispozitivul de automatizare acționează asupra instalației tehnologice.

● Măsurarea automată asigură o informare cantitativă asupra mărimilor — parametrilor — dintr-un proces tehnologic.

● Controlul automat constituie un caz particular de măsurare, în care interesează numai dacă valoarea mărimii controlate este mai mare (sau mai mică) decît o valoare prescrisă.

● Comanda automată reprezintă intervenția dispozitivului de automatizare în modificarea poziției sau stării unor agregate sau elemente din instalația tehnologică în scopul modificării unor parametri din proces.

● Semnalizarea asigură o operație de informare asupra poziției sau stării agregatelor și de obicei însoțește (confirmă) comanda.

● Reglarea automată asigură menținerea la o valoare prescrisă a unei mărimi, independent de modificările (perturbațiile) ce intervin într-un proces tehnologic.

Reglarea se realizează pe baza măsurării parametrilor și a comenzii organelor de execuție în scopul modificării parametrilor respectivi:

REGLARE = MĂSURARE + COMANDĂ

VERIFICAREA CUNOȘTINȚELOR

1. Funcționarea traductoarelor inductive se bazează pe:
   a — legea inducției electromagnetice?
   b — variația reluctanței circuitului magnetic?
   c — modificarea curentului electric ce străbate traductorul?
2. Funcționarea unui releu are loc în cazul:
   a — atingerii unei anumite valori a mărimii de intrare?
   b — închiderii contactelor normal deschise?
   c — deschiderii contactelor normal închise?
3. Elementele de execuție sînt părți ale sistemelor automate prin care:
   a — dispozitivul de automatizare comandă instalația tehnologică?
   b — dispozitivul de automatizare este informat asupra poziției (stării) agregatelor?
   c — dispozitivul de automatizare este informat asupra valorii parametrilor?
4. Măsurarea automată asigură:
   a — varierea parametrilor din proces?
   b — informarea cantitativă asupra parametrilor din proces?
   c — reglarea parametrilor din proces?
5. Controlul automat poate fi realizat cu ajutorul unui:
   a — releu?
   b — ampermetru?
   c — manometru?
6. Comanda automată are ca scop final:
   a — modificarea elementelor de automatizare?
   b — modificarea parametrilor din proces?
   c — modificarea poziției releelor?
7. SRA cu regulatoare indirecte asigură:
   a — măsurarea indirectă a mărimii controlate?
   b — comanda instalației tehnologice folosind o sursă de energie separată?
   c — comanda instalației tehnologice folosind un element de execuție?

CAPITOLUL 13

MĂSURI DE TEHNICA SECURITĂȚII ȘI PROTECȚIA MUNCII ÎN INSTALAȚIILE ELECTRICE

A. NOȚIUNI GENERALE

1. ACȚIUNEA CURENTULUI ELECTRIC ASUPRA CORPULUI OMENESC

Deoarece corpul omenesc reprezintă o rezistență electrică, rezultă că atunci cînd între două puncte ale corpului omenesc (mînă-mînă, mînă-picior etc.) se aplică accidental o diferență de potențial, prin corpul omenesc va circula un curent electric.

Efectele curentului electric depind de o serie de factori: felul curentului, intensitatea, frecvența, durata de parcurgere și, mai ales, traseul curentului prin corp.

Atenție! *Cel mai periculos traseu al curentului este cel dintre mîna stîngă și piciorul drept care parcurge în mod sigur inima.*

Efectele curentului electric constau în:

— șocuri electrice — care afectează sistemul nervos (pierderea cunoștinței, oprirea inimii, asfixiere, comoția cerebrală etc.);

— electrotraumatisme — care afectează sistemul muscular, sistemul osos, pielea etc. (arsuri — „mărci electrice", încordarea mușchilor etc.).

Uneori pot apărea efecte secundare ale electrocutării, cum ar fi: căderi de la înălțime, lovituri datorate mișcărilor reflexe bruște etc.

Rezistența electrică a corpului omenesc este de 10 000 ... 50 000 ohmi cînd pielea este uscată, însă scade foarte mult (800 ... 1 000 ohmi) în caz de umezeală sau transpirație.

Atenție! *Practic, întreaga rezistență a corpului omenesc este concentrată în piele, care în stare uscată este un bun dielectric; restul corpului, datorită umidității și a sărurilor din sînge, are rezistență electrică neglijabilă.*

2. INSTALAȚIILE ELECTRICE, DIN PUNCTUL DE VEDERE AL NORMELOR DE PROTECȚIE A MUNCII

În general, după valoarea tensiunii de serviciu, instalațiile electrice se împart astfel:

— instalații de înaltă tensiune — cînd tensiunea între faze este egală sau mai mare de 1 000 V;

— instalații de joasă tensiune — cînd tensiunea între faze este mai mică de 1 000 V.

În cadrul tensiunilor joase se consideră tensiuni periculoase din punctul de vedere al protecției muncii tensiunile ce depășesc următoarele valori (pe fază):

— *în curent alternativ*	$U_{min} = 24$ V;
cu nulul izolat	$U_{min} = 24$ V;
cu nulul legat la pămînt	$U_{min} = 42$ V;
— *în curent continuu*	$U_{min} = 50$ V.

Observație. Tensiuni periculoase din punctul de vedere al protecției muncii prezintă nu numai instalațiile de înaltă tensiune, ci și o bună parte din cele de joasă tensiune (de exemplu tensiunea joasă de 220 V este de peste 5 ori mai mare decît valoarea periculoasă de 42 V).

B. MĂSURI DE PREVENIRE A ACCIDENTELOR ÎN INSTALAȚIILE ELECTRICE

În scopul prevenirii accidentelor în instalațiile electrice se prevăd o serie de măsuri cu caracter organizatoric și tehnic care pot fi împărțite în următoarele categorii:

— reguli pentru evitarea electrocutării;
— instruirea personalului de exploatare;
— echipamente și indicatoare de protecție;
— legarea la pămînt și la nul.

1. REGULI PENTRU EVITAREA ELECTROCUTĂRII

Instalațiile electrice trebuie astfel concepute încît să nu fie posibilă producerea accidentelor consecință a pătrunderii persoanelor nespecializate în locurile cu pericul de electrocutare.

Instalațiile electrice interioare sau exterioare vor fi prevăzute cu îngrădiri — plase de sîrmă — iar porțile vor fi încuiate.

Distanțele pînă la părțile aflate sub tensiune, lățimea culoarelor de acces etc., trebuie să respecte anumite valori prevăzute în standarde și prescripții.

Dispozitivele de acționare ale separatoarelor și întreruptoarelor trebuie să fie blocate sau încuiate pentru a se evita manevre greșite sau de către persoane neautorizate.

2. INSTRUIREA PERSONALULUI

Persoanele care au atribuții în cadrul activității de întreținere și exploatare a instalațiilor electrice trebuie să îndeplinească următoarele condiții:

— să fie sănătoase fizic și psihic și să nu aibă infirmități care, stînjenind activitatea necesară, pot provoca accidente;

— să aibă calificarea profesională corespunzător lucrărilor pe care le execută;

— să fie instruite și verificate asupra normelor de protecție a muncii;

— să aibă autorizație de lucru sau de control în instalații electrice.

Instruirea personalului se desfășoară după anumite norme precise efectuîndu-se:

— instructaj la angajare;
— instructaj periodic de verificare a cunoștințelor;
— instructaj pentru efectuarea unei anumite operații.

În scopul reducerii la minimum a riscului de accident manevrele și lucrările în instalațiile electrice de înaltă tensiune se execută de cel puțin două persoane (pe baza unei dispoziții de lucru scrise) dintre care una are rolul de supraveghetor.

Atenție! *Se recomandă ca cel ce efectuează anumite manevre în instalațiile de înaltă tensiune să anunțe cu voce tare — chiar pentru sine — operațiile pe care le execută, aceasta în scopul unei concentrări la maximum asupra operațiilor respective.**

3. ECHIPAMENTE ȘI INDICATOARE DE PROTECȚIE

În scopul desfășurării activității în instalațiile electrice sînt necesare unele echipamente speciale de protecție care au proprietăți izolante.

Procedeul de izolare electrică este obligatoriu chiar și în cazul cînd există și alte mijloace de protecție. Astfel se prevăd:

— clești de lemn (fig. 13.1, *a*) pentru fixarea siguranțelor;
— clești (patent) și șurubelnițe cu mînere izolante (fig. 13.1, *b* și *c*);
— mănuși de cauciuc (fig. 13.1, *d*);
— cizme sau galoși de cauciuc (fig. 13.1, *e*);
— covorașe de cauciuc (fig. 13.1, *f*).

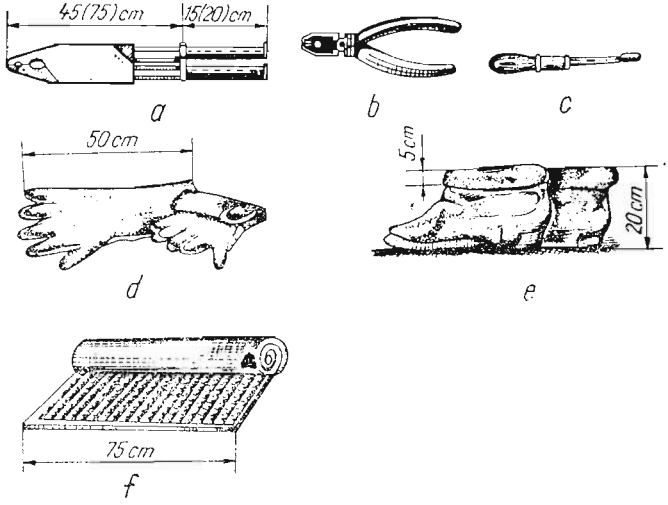


Fig. 13.1. Echipamente de protecția muncii:
a — clește de lemn; *b* — clește patent izolant; *c* — șurubelniță izolantă; *d* — mănuși de cauciuc; *e* — cizme și galoși de cauciuc; *f* — covorașe de cauciuc.

* De exemplu, sînt cunoscute accidente cînd în loc să se deschidă (fără pericol) un anumit separator, a fost deschis altul alăturat ceea ce a produs scurtcircuit pe bare, incendierea secției și victime omenești.

De asemenea se mai folosesc și alte mijloace de protecție cum ar fi: platforme electroizolante, prăjini electroizolante, ochelari de protecție etc.

Pentru a se evita pătrunderea accidentală în instalații de înaltă tensiune, pentru a se delimita zona de lucru etc. se prevăd diverse plăci avertizoare cu inscripții corespunzătoare, după caz, de exemplu:

— *Înaltă tensiune! Pericol de moarte!*

— *Lucrați aici!*

— *Nu închideți! Se lucrează pe linie!* etc.

4. LEGAREA LA PĂMÎNT ȘI LA NUL

Părțile metalice ale instalațiilor electrice care în mod normal nu sînt sub tensiune, ca de exemplu carcasele mașinilor electrice, cuvele transformatoarelor, panourile metalice, stelajele stîlpilor etc. poartă denumirea generală de masă a instalației respective.

În mod accidental, datorită deteriorării izolației conductoarelor, masa care este neutră din punct de vedere electric capătă un anumit potențial care poate fi periculos pentru om.

În adevăr, așa cum se observă de exemplu din figura 13.2 în cazul cînd nu se iau măsuri de protecție, un om atingînd masa (carcasa) unui motor care are o fază pusă la masă este supus unei diferențe de potențial. Această diferență de potențial face să circule prin corpul său un curent I_0 care se închide prin priza de pămînt a neutrului transformatorului de alimentare. În scopul evitării acestui accident se prevede ca: TOATE PĂRȚILE METALICE ALE INSTALAȚIILOR ELECTRICE CARE ÎN MOD NORMAL NU SÎNT SUB TENSIUNE ÎNSĂ CARE ÎN MOD ACCIDENTAL POT CĂPĂTA TENSIUNI PERICULOASE TREBUIE SĂ FIE LEGATE LA PĂMÎNT SAU LA NUL.

Legarea la pămînt se realizează cu ajutorul unor conductoare de cupru sau oțel legate la prizele de pămînt.

Prizele de pămînt se execută din țevi sau platbande de oțel sudate împreună și îngropate în pămînt la adîncimi de 1 ... 3 m.

Atenție! *Este interzisă folosirea aluminiului ca element de legare la pămînt deoarece prezintă rezistență mecanică redusă și instabilitate la agenții chimici.*

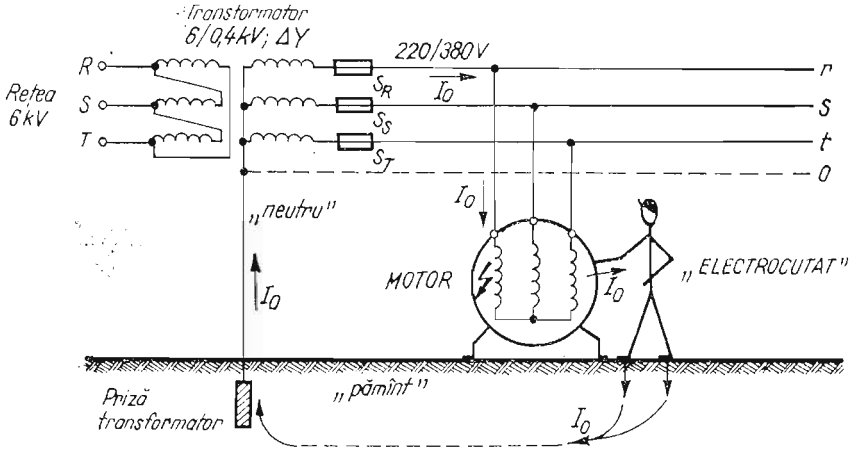


Fig. 13.2. Exemplu de instalație electrică nelegată la pămînt.

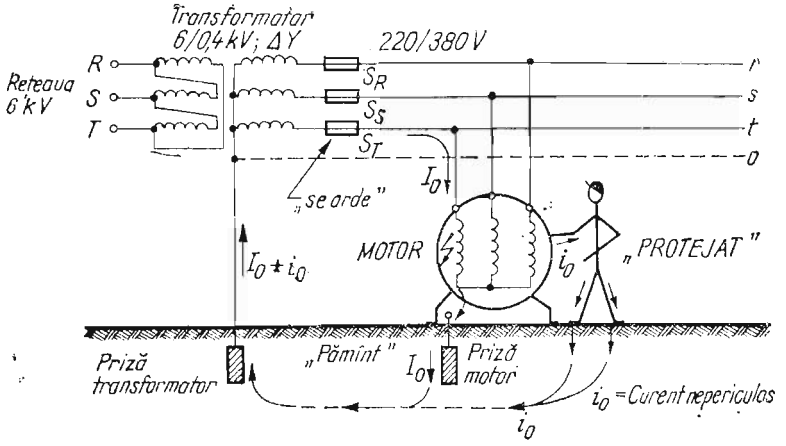


Fig. 13.3. Exemplu de instalație electrică legată la pământ.

Din figura 13.3 se observă de exemplu că în cazul legării la pământ a carcasei unui motor, orice punere la masă devine un scurtcircuit monofazat astfel că:

— curentul I_0 produce arderea siguranței S_T, deci separă carcasa de tensiune;

— chiar dacă înainte de arderea siguranței omul se află cu mîna pe carcasa motorului, datorită prizei de pămînt curentul i_0 care se ramifică prin corpul său este de o valoare nepericuloasă.

Legarea la nul (neutrul) se realizează în cazurile cînd nu se pot executa prize de pămînt de protecție — de exemplu în locuințe. În aceste situații părțile metalice ale instalațiilor se leagă la firul neutru al rețelei. Se observă, de exemplu, din figura 13.4 că prin legarea carcasei motorului la firul neutru se obțin, practic, aceleași efecte ca și în cazul legării la pământ.

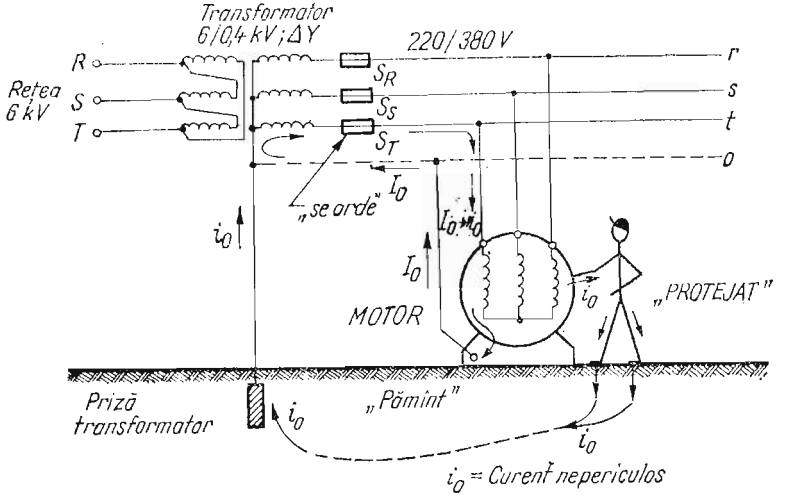


Fig. 13.4. Exemplu de instalație electrică legată la nul.

Pentru a se evita separarea firului neutru de priza de pămînt se iau următoarele măsuri:

— se efectuează legarea repetată la pămînt a firului neutru prin prize suplimentare;

— nu se montează siguranțe pe firul neutru.

C. MĂSURI ÎN CAZ DE ELECTROCUTARE

1. SCOATEREA ACCIDENTATULUI DE SUB TENSIUNE

În caz de electrocutare, accidentatul este șocat puternic, mușchii săi se contractă sau își pierde cunoștința și în consecință nu se poate elibera singur de elementul aflat sub tensiune. Ca urmare se iau următoarele măsuri:

— se întrerupe tensiunea prin deconectarea acelei părți cu care accidentatul se află în contact;

— în instalațiile de joasă tensiune în cazul în care tensiunea nu poate fi întreruptă suficient de repede, accidentatul se îndepărtează;

— prin împingerea și îndepărtarea conductoarelor cu ajutorul unei tije izolante („stangă") — figura 13.5;

— prin tragere, fără a-l atinge direct, ci prin intermediul îmbrăcămintei (fig. 13.6) dacă aceasta este uscată, a unei pături, a unei scînduri sau a unui material izolant;

— prin izolare față de pămînt introducînd sub accidentat o scîndură uscată.

Atenție! *Întotdeauna trebuie avut în vedere că atingerea directă a persoanei accidentate, fără a se lua măsuri de izolare, prezintă pericol și pentru viața celui care intervine.*

2. MĂSURI DE PRIM AJUTOR

Dacă accidentatul nu și-a pierdut cunoștința trebuie să fie ținut în repaus pînă la venirea medicului sau să fie transportat la un punct sanitar.

Dacă accidentatul și-a pierdut cunoștința, însă nu i s-a întrerupt respirația, trebuie să fie întins pe un pat sau o pătură uscată, descheiat la haine și fricționat pentru a-i activa circulația.

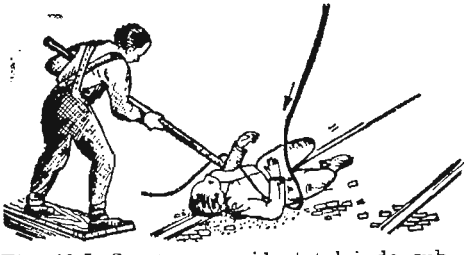


Fig. 13.5. Scoaterea accidentatului de sub tensiune prin împingere.

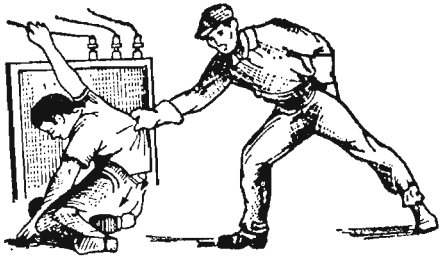


Fig. 13.6. Scoaterea accidentatului de sub tensiune prin tragere.

Atenție! *Persoanele de prisos trebuie să fie îndepărtate din jurul accidentatului, pentru ca acesta să aibă aer suficient.*

Dacă lipsesc semnele de viață (respirație, bătăile inimii, pulsul) sau respirația este neregulată, accidentatului i se face respirația artificială.

Respirația artificială se continuă pînă la readucerea la viață sau pînă la apariția semnelor sigure de deces pe care le poate constata numai medicul.

Atenție! *Primul ajutor trebuie să se acorde cît mai repede, iar respirația artificială trebuie efectuată continuu, cunoscut fiind că electrocutarea provoacă deseori numai o moarte aparentă.*

3. METODE DE RESPIRAȚIE ARTIFICIALĂ

● **Metoda de acționare toracică** presupune două (trei) persoane care asigură respirația artificială.

Accidentatul este așezat pe spate punîndu-i-se sub omoplați o pernă sau un pachet de haine astfel încît capul să fie lăsat pe spate (mai jos ca pieptul).

I se scoate limba afară și o persoană o reține trasă spre bărbie.

Cea de-a doua persoană care acordă ajutorul se așază în genunchi, lîngă capul accidentatului, îi apucă mîinile de lîngă coate și le apasă încet pe piept (expirație).

Numărînd: unu, doi trei, ridică mîinile accidentatului și i le întinde înspre cap și lateral (inspirație).

Numărînd: patru, cinci, șase apasă din nou mîinile pe piept ș.a.m.d.

Notă. Cînd pieptul se comprimă și se relaxează se obține un sunet, ca un oftat provocat de trecerea aerului prin trahee. Dacă sunetul nu se aude, limba se trage și mai mult în afară pentru a nu împiedica trecerea aerului.

Atenție! *Această metodă nu se aplică dacă mîinile sau clavicula sînt fracturate.*

● **Metoda „gură la gură".** Această metodă se aplică și în cazul în care accidentatul are fracturi sau arsuri.

Se așază accidentatul în poziția orizontală ca și în cazul precedent.

Cel care acordă ajutorul inspiră puternic și apropiind gura sa (direct sau prin intermediul unui tub) de gura accidentatului îi insuflă aerul observînd umflarea toracelui accidentatului.

Se ridică pentru a inspira din nou observînd expirația accidentatului, care se produce de la sine.

Se repetă acest ciclu, cu o frecvență de 12 ... 15 ori pe minut, pînă la reanimare sau pînă la constatarea morții reale de către medic.

REZUMAT

● Instalațiile electrice cu tensiuni ce depășesc 40 ... 50 V sînt periculoase în anumite condiții pentru corpul omenesc.

● Prevenirea accidentelor în instalațiile electrice se asigură prin:

— respectarea unor reguli de evitare a accidentelor;

— instruirea periodică a personalului de exploatare;

— folosirea unor echipamente izolante;

— legarea la pămînt sau la nul a părților metalice fără tensiune a instalațiilor (masa).

● Măsurile necesare în caz de electrocutare sînt următoarele:

— întreruperea circuitului electric pe care s-a produs accidentul;

— îndepărtarea accidentatului de la locul accidentului;

— acordarea primului ajutor printr-o plasare adecvată a accidentatului și efectuarea respirației artificiale.

VERIFICAREA CUNOȘTINȚELOR

1. Se consideră că prezintă tensiuni periculoase numai instalațiile electrice:
   a — de înaltă tensiune?
   b — de curent alternativ?
   c — cu tensiuni ce depășesc 40 ... 50 V?

2. Rezistența electrică a corpului omenesc este repartizată de-a lungul traseului curentului:
   a — neuniform, fiind mai concentrată în piele?
   b — neuniform, fiind mai concentrată în oase?
   c — în mod uniform?

3. La aceeași valoare a tensiunii pe fază cea mai periculoasă rețea de curent alternativ este:
   a — rețeaua cu nulul izolat?
   b — rețeaua cu nulul legat la pămînt?
   c — amîndouă în mod egal?

4. Echipamentele de protecție (izolante) se folosesc la diverse manevre în instalațiile electrice:
   a — pentru personalul neinstruit?
   b — pentru personalul instruit?
   c — pentru orice persoană?

5. Legarea de protecție a masei instalațiilor se poate realiza:
   a — numai prin legare la nul?
   b — numai prin legare la pămînt?
   c — prin legare la nul sau la pămînt?

6. Dacă accidentatul prezintă fractura brațelor și nu respiră, i se aplică următoarea măsură de ajutor:
   a — respirația artificială gură la gură?
   b — orice metodă de respirație artificială?
   c — este lăsat liniștit pînă la sosirea medicului?

RĂSPUNSURI CORECTE

Cap. 1: 1*b*; 2*b*; 3*c*; 4*a*; 5*b*; 6*a*; 7*c*; 8*c*.

Cap. 2: 1*c*; 2*b*; 3*b*; 4*a*; 5*b*; 6*a*; 7*b*; 8*c*.

Cap. 3: 1*c*; 2*b*; 3*a*; 4*c*; 5*a*; 6*c*; 7*c*; 8*a*.

Cap. 4: 1*b*; 2*c*; 3*b*; 4*c*; 5*a*; 6*a*; 7*b*.

Cap. 5: 1*b*; 2*a*; 3*c*; 4*a*.

Cap. 6: 1*a*; 2*c*; 3*b*; 4*b*; 5*a*; 6*c*; 7*b*.

Cap. 7: 1*b*; 2*a*; 3*c*.

Cap. 8: 1*a*; 2*c*; 3*b*; 4*a*; 5*c*; 6*a*.

Cap. 9: 1*c*; 2*b*; 3*b*; 4*c*; 5*c*.

Cap. 10: 1*b*; 2*c*; 3*a*; 4*b*; 5*c*; 6*b*.

Cap 11: 1*a*; 2*a*; 3*c*; 4*a*.

Cap. 12: 1*b*; 2*a*; 3*a*; 4*b*; 5*a*; 6*b*; 7*b*.

Cap 13: 1*c*; 2*a*; 3*b*; 4*b*; 5*c*; 6*a*.

CUPRINS

Cap. 1. ELECTROSTATICA 3

A. Electrizarea corpurilor 3
B. Legea lui Coulomb 5
C. Cîmpul electric 6
D. Inducția și fluxul electric. Teorema lui Gauss 8
E. Potențial și diferența de potențial 11
F. Condensatoare electrice 13
G. Polarizarea dielectricilor. Rigiditatea dielectrică 18
H. Energia cîmpului electric 19

Cap. 2. CURENTUL CONTINUU

A. Curentul electric continuu. Efectele sale 23
B. Legea lui Ohm. Rezistența electrică 25
C. Energie și putere electrică. Legea lui Joule-Lenz 30
D. Rețele de curent continuu 3
E. Teoremele lui Kirchhoff 36
F. Surse și receptoare. Metode de conectare 38
G. Calculul rețelelor de curent continuu 46

Cap. 3. ELECTROMAGNETISM

A. Fenomene magnetice și electromagnetice 54
B. Inducția magnetică și intensitatea cîmpului magnetic 56
C. Forțe electromagnetice și electrodinamice. Flux magnetic 57
D. Circuite magnetice 61
E. Inducția electromagnetică 68
F. Energia cîmpului magnetic 73

Cap. 4. CURENTUL ALTERNATIV

A. Curentul alternativ monofazat 76
B. Circuite de curent alternativ monofazat 82
C. Curentul alternativ trifazat 93
D. Puterea în curent alternativ 96

Cap. 5. PRODUCEREA, TRANSPORTUL, DISTRIBUȚIA ȘI UTILIZAREA ENERGIEI ELECTRICE

A. Sisteme energetice 104
B. Centrale electrice 105
C. Stații de transformare 112
D. Linii electrice de transport și distribuție 113
E. Utilizarea energiei electrice 114

Cap. 6. MAȘINI ELECTRICE ȘI ACȚIONĂRI

A. Noțiuni generale 118
B. Transformatoare electrice 120

C. Mașini de curent continuu 129
D. Mașini sincrone 143
E. Mașini asincrone 146

Cap. 7. APARATE ELECTRICE DE ÎNALTĂ ȘI JOASĂ TENSIUNE

A. Noțiuni generale 157
B. Aparate electrice de înaltă tensiune 158
C. Aparate electrice de joasă tensiune 161

Cap. 8. MĂSURĂRI ELECTRICE

A. Noțiuni generale 170
B. Aparate electrice de măsurare 171
C. Măsurarea mărimilor electrice 179
D. Transformatoare de măsură 190

Cap. 9. INSTALAȚII DE LUMINĂ ȘI FORȚĂ

A. Noțiuni generale 194
B. Materiale și aparate folosite în instalațiile electrice de joasă tensiune 196
C. Executarea instalațiilor electrice de lumină și forță 204

Cap. 10. COMPONENTE ȘI CIRCUITE ELECTRONICE

A. Noțiuni generale 213
B. Noțiuni de fizică electronică 214
C. Tuburi electronice 218
D. Semiconductoare 225
E. Circuite electronice 232

Cap. 11. APLICAȚII ALE ELECTRONICII

A. Domenii de aplicație 245
B. Redresoare 246
C. Radiofonia 250
D. Osciloscopul catodic 252
E. Televiziune 253
F. Voltmetrul electronic 255

Cap. 12. AUTOMATICA

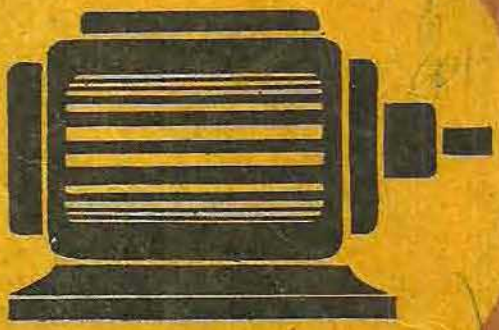
A. Introducere în automatică 260
B. Elementele componente ale sistemelor automate 264
C. Exemple de sisteme automate 272

Cap. 13. MĂSURI DE TEHNICA SECURITĂȚII ȘI PROTECȚIA MUNCII ÎN INSTALAȚIILE ELECTRICE

A. Noțiuni generale 286
B. Măsuri de prevenire a accidentelor în instalațiile electrice 287
C. Măsuri în caz de electrocutare 291

Plan editură 12 278 Tiraj 3 600 + 50 ex. broșate. Coli de tipar 18,50

Tiparul executat sub comanda nr. 162 la Întreprinderea poligrafică „13 Decembrie 1918" str. Grigore Alexandrescu nr. 89—97 București, Republica Socialistă România

Lei 11,20

EDITURA DIDACTICĂ ŞI PEDAGOGICĂ, BUCUREŞTI — 1979